

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**“APLICACIÓN DEL METODO DE REFRACCION  
SISMICA PARA LA DETERMINACION DE  
VELOCIDADES DE ONDAS P”**

PRESENTADO POR:  
**JOSE MANUEL LOPEZ AVALOS  
JULIO ANTONIO MEJIA CARRILLOS  
NESTOR DANILO VEGA**

PARA OPTAR AL TITULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**  
CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2008

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

**SECRETARIO GENERAL :**

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIO :**

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**DIRECTOR :**

**MSc.-ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERON**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO CIVIL**

Título :

**“APLICACIÓN DEL METODO DE REFRACCION  
SISMCA PARA LA DETERMINACION DE  
VELOCIDADES DE ONDAS P”**

Presentado por :

**JOSE MANUEL LOPEZ AVALOS  
JULIO ANTONIO MEJIA CARRILLOS  
NESTOR DANILO VEGA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJIA  
ING. JOSE ANTONIO GONZALEZ MAGAÑA  
ING. LUIS ADOLFO ALVARADO CHORRO**

San Salvador, Marzo de 2008

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJIA**

**ING. JOSE ANTONIO GONZALEZ MAGAÑA**

**ING. LUÍS ADOLFO ALVARADO CHORRO**



## DEDICATORIA

DEDICO MI ESTUDIO ESPECIALMENTA A:

***DIOS TODOPODEROSO:*** Por su inmenso amor, por iluminar y proteger cada instante de mi vida, por permitirme la felicidad y satisfacción de haber alcanzado una de mis principales metas.

***A LA VIRGEN MARIA:*** Por brindar ese cariño y protección de madre.

***A MIS PADRES:*** Victor Manuel López Urbina y María Yolanda Avalos de López, por el apoyo y amor que siempre me brindaron, la confianza que depositaron en mi y sobretodo por el esfuerzo que realizaron para brindarme una buena educación.

***A MIS HERMANAS:*** Joseline y Claudia Por brindarme siempre su compañía, su amor y comprensión, apoyándome con palabras de aliento y consuelo en todos los momentos de mi vida.

***A MIS ABUELOS:*** Por brindarme una inspiración a seguir en la vida (Q.D.D.G).

***A MIS TIOS:*** Por demostrarme su cariño, apoyo incondicional y confianza en mi.

***A MI ESPOSA:*** Bessy Xiomara por su apoyo y comprensión en todo momento.

***A MIS COMPAÑEROS:*** Por el esfuerzo que cada uno puso para la realización de este trabajo de graduación.

***A TODAS AQUELLAS PERSONAS Y AMIGOS:*** Que de alguna forma estuvieron involucradas en el desarrollo de mi carrera y en la realización de este trabajo de graduación, gracias.

Con todos comparto este logro.

***JOSE MANUEL LOPEZ AVALOS***

## DEDICATORIA:

A Dios, gracias infinitas doy, por brindarme la oportunidad de alcanzar uno de mis mayores anhelos: Ser Ingeniero Civil.

A mi Madre del Cielo, María Inmaculada, por acompañar y ser mediadora de las necesidades de este guerrero.

A mi Madre, Ada Morena, por sacrificar lo más importante en su vida y con ello dar paso para que mis hermanos y yo tuviésemos una mayor formación académica.

A mi segunda Mami, Araceli, por sus oraciones, apoyo y cariño incondicional, los cuales me han proporcionado la fortaleza y el valor suficiente para encarar y superar cualquier adversidad.

A mi hermanitos: Emersón Raúl, Jonatán Alejandro, Karla Rubenia y Claudia Araceli, por la bendición de contar con su presencia, atención, apoyo, consejos y oraciones, con lo cual he podido concretizar este y otros logros en mi vida.

A mi Tío Raúl, por su aprecio, ejemplo y autoridad, con lo cual trazo la dirección de mi sendero.

Al Ingeniero Ignacio Francés, por su consejo oportuno para ayudarme a visualizar el potencial de esta investigación.

A los asesores de este trabajo de graduación: Ingra. Lesly Mendoza, Ing. Luis Chorro e Ing. José Antonio González, por su dedicación en el desarrollo de este documento, ya que sin su ayuda, esto no sería una gozosa realidad.

A mis compañeros de tesis, por la oportunidad haber alcanzado esta meta juntos.

Al Dr. Edwin Portillo, por el apoyo, comprensión y colaboración brindada en el desarrollo de este trabajo de graduación.

A toda mi familia, por sus oraciones, consejos y cariño, en especial a Tía Elsy e hijas, Tía Rubenia e hijos, Tía Lupe e hijas y Abuelita Eva.

Y por supuesto, a todas las personas con las que he compartido tanto momentos alegres como difíciles, en los que mostrando las maravillas de su corazón me han brindado su amistad incondicional, respeto y cariño, en especial a Lawrence (Q.D.D.G.), Miguel, Mayra, Antonio, Carlos, Farid y Angélica.

Agradecido de corazón....

NÉSTOR DANILO VEGA

## INDICE GENERAL

### **CAPITULO I**

1.1 INTRODUCCION	i
1.2 ANTECEDENTES	1
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.4 JUSTIFICACION	7
1.5 OBJETIVO GENERAL	
1.5.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS	8
1.6 ALCANCES	9
1.7 LIMITANTES	10
1.8 METODOLOGIA PARA LA INVESTIGACION	11

### **CAPITULO II**

2.1 INTRODUCCION	14
2.2 EXPLORACION DEL SUBSUELO	15
2.2.1 SONDEOS MECANICOS Y CALICATAS	15
2.2.1.1 SONDEOS MECANICOS	17
2.2.1.2 CALICATAS	18
2.2.2 ENSAYOS DE LABORTORIO	19
2.2.2.1 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACION DE PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELO	21
2.3 METODOS GEOFISICOS DE EXPLORACION	28

2.3.1 METODOS GEOFISICOS	28
2.3.2 METODO GRAVIMETRICO	29
2.3.3 METODO MAGNETICO	29
2.3.4 METODOS ELECTRICOS	30
2.4 METODOS SISMICOS	30
2.4.1 FUNDAMENTO TEORICO DE ONDAS	31
2.4.1.1 PARAMETROS PARA LA DESCRIPCION DE ONDAS	31
2.4.1.2 ONDAS ELASTICAS	31
2.4.1.3 FENOMENOS EN LA PROPAGACION	34
2.4.1.4 LEY DE SNELL	35
2.4.1.5 PRINCIPIO DE HUYGENS	37
2.4.1.6 PRINCIPIO DE FERMAT	40
2.4.2 METODO DE REFRACCION SISMICA	40
2.4.3 METODO DE REFLEXION SISMICA	44
2.4.4 METODOS DE EXPLORACION EN POZOS	47
2.4.4.1 METODO UP-HOLE	47
2.4.4.2. METODO DOWN HOLE	48
2.4.4.3 METODO CROSS HOLE	50
2.4.5 METODOS DE ONDAS SUPERFICIALES	53
2.4.5.1 METODO MASW	54
2.4.5.2 METODO SASW	56

2.5 ORIGEN GEOLOGICO DE LOS SUELOS DE SAN SALVADOR	60
2.5.1 DEFINICION DE TIERRA BLANCA	60
2.5.2 ORIGEN DE LA TIERRA BLANCA DE SAN SALVADOR	61
2.5.3 MAPA DE ESPESORES	62
2.5.4 COMPOSICION DE LOS SUELOS DE SAN SALVADOR	62

### **CAPITULO III**

3.1 INTRODUCCION	73
3.2 GENERALIDADES SOBRE EL METODO DE REFRCCION SISMICA	74
3.3 DESCRIPCION DEL EQUIPO DE MEDICION UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE REFRACCION SISMICA	79
3.3.1 GEOFONOS	80
3.3.1.1 TIPOS DE GEOFONOS Y SUS CARACTERISTICAS	81
3.3.1.2 CABLE DE CONEXIÓN DE GEOFONO-SISMOGRAFO	83
3.3.2 CABLE DE CONEXIÓN DE GEOFONOS-SISMOGRAFO	84
3.3.3 SISMOGRAFO	85
3.3.3.1 SISMOGRAFOS CON CANAL UNICO	86
3.3.3.2 SISMOGRAFOS MULTICANAL	86
3.3.4 AMPLIFICADORES	88
3.3.5 UNIDAD DE CONTROL Y ALMACENAMIENTO	88

3.3.5 FUENTE DE ENERGIA	89
3.3.7 SISTEMA DE DISPARO (TRIGGER)	93
3.4 METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DEL	
ENSAYO DE REFRACCION, SEGÚN NORMA ASTM-D5777	95
3.4.1 CALIFICACION DEL PERSONAL	95
3.4.2 PLANEAMIENTO DE LA INSPECCION	95
3.4.2.1 OBJETIVO DE LA INSPECCION POR	
REFRACCION SISMICA	95
3.4.2.2 VALORACION DEL CONTRASTE DE	
VELOCIDAD SISMICA	97
3.4.2.3 SELECCIÓN DEL METODO DE	
INTERPRETACION	97
3.4.2.4 DISEÑO DE LA INSPECCION	98
3.4.3 EJECUCUCION DE LA INSPECCION	100
3.4.3.1 CHEQUEO DEL PLAN DE LA INSPECCION	
EN EL SITIO DE INTERES	100
3.4.3.2 PROCEDIMIENTO DE CAMPO PARA LA	
REALIZACION DE LA INSPECCION	100
3.4.3.3 CONTROL DE CALIDAD	111
3.4.3.4 CALIBRACION Y ESTANDARIZACION	112
3.4.4 INTERPRETACION DE DATOS DE REFRACCION	
SISMICA	112

3.4.4.1 METODO DE INTERPRETACION	112
3.4.4.2 INTERPRETACION PRELIMINAR	114
3.4.4.3 VERIFICACION E INTERPRETACION DE REFRACCION SISMICA	115
3.4.4.4 REPRESENTACION DE DATOS	115
3.4.5 CONTENIDO DEL REPORTE DE UNA INSPECCION DE REFRACCION SISMICA	115
3.5 TEORIA BASICA SOBRE EL METODO DE REFRACCION SISMICA	117
3.5.1 SUPOSICIONES DEL METODO DE REFRACCION SISMICA	117
3.5.2 TRAYECTORIAS DE LAS ONDAS	118
3.5.3 SISMOGRAMA	121
3.5.4 CURVAS TIEMPO DISTANCIA (CURVA T-X)	123
3.5.5 PRINCIPIOS GENERALES DE INTERPRETACION EN REFRACCION	125
3.5.5.1 LEY DE LAS VELOCIDADES APARENTES	125
3.5.5.2 PRINCIPIO DE RECIPROCIDAD	126
3.5.5.3 PRINCIPIO DEL INTERCEPTO EN EL ORIGEN	128
3.5.5.4 PRINCIPIO DE PARARELISMO	128
3.5.6 METODOLOGIA DE CALCULO	129
3.5.6.1 METODO TIEMPO-INTERCEPTO	130

3.5.7 LIMITACIONES Y POSIBLES CAUSAS DE ERROR DEL	
METODO DE REFRACCION SISMICA	139
3.5.7.1 TENDIDOS, TRASLAPES Y MEDICION DE	
TIEMPOS DE ARRIBO	139
3.5.7.2 SITIOS DE MEDICION	139
3.5.7.3 INTERPRETACION	140
3.5.7.4 CAPACIDAD DE LA FUENTE	141
3.5.7.5 CLIMA	141
3.5.7.6 ERRORES HUMANOS	141
3.5.7.7 CONDICIONES GEOLOGICAS	142
3.6 INFORMACION DE REFERENCIA NECESARIA PARA EL	
DESARROLLO ENSAYO DE REFRACCION SISMICA	143
3.6.1 VELOCIDADES DE ONDAS P Y S PARA ALGUNOS	
TIPOS DE MATERIALES	143
3.6.2 RELACIONES ENTRE PARAMETROS DINAMICOS	
DEL SUELO Y LA VELOCIDAD DE ONDAS P Y S	144
3.6.3 COEFICIENTE DE POISSON	146
3.6.4 CLASIFICACION GEOMECANICA DEL TERRENO	151
3.6.5 OTROS PARAMETROS GEOTECNICOS	153
3.6.6 EXCAVABILIDAD Y RIPEABILIDAD	154



3.6.7 RELACIONES ENTRE EL VALOR DE N DEL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR Y LAS VELOCIDADES DE ONDAS P Y S	155
3.6.8 RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE ONDAS S Y EL VALOR DE N DEL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR, SEGÚN LA NORMA JAPONESA	156
3.6.9 RECOMENDACIONES EN ESTADOS UNIDOS DE AMERICA	156
3.6.10 RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE ONDAS “S” Y EL VALOR DE “N” DEL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR, SEGÚN LA NORMA ESPAÑOLA	158
3.6.11 ENSAYO SPT	158
3.6.12 METODO DE SIMPLIFICACION SPT	160

## **CAPITULO IV**

4.1 INTRODUCCION	164
4.2 ESTUDIO DE REFRACCION SISMICA EN LAS INSTALACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR	165
4.2.1 GENERALIDADES	165
4.2.1.1 INTRODUCCION	165
4.2.1.2 OBJETIVO	166

4.2.1.3 GENERALIDADES SOBRE EL METODO DE REFRACCION	167
4.2.2. PLANEAMIENTO DE LA INSPECCION	169
4.2.2.1 PERSONAL	169
4.2.2.2 EQUIPO	170
4.2.2.3 CARACTERISTICAS DEL SITIO	171
4.2.2.4 VALORACION DEL CONTRASTE DE VELOCIDAD SISMICA	173
4.2.2.5 SELECCIÓN DEL METODO DE INTERPRETACION	174
4.2.2.6 DISEÑO DE LA INSPECCION	175
4.2.3 TRABAJO DE CAMPO	176
4.2.4 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	189
4.2.4.1 PROCESAMIENTO DE REFRACCION SISMICA	189
4.2.5 EVALUACION DE RESULTADOS	202
4.2.5.1 ESTUDIO DE SELOS REALIZADO POR LA EMPRESA F.C. S.A DE C.V.	202
4.2.6 CONCLUSIONES	216
4.3 METODOLOGIA PARA LA CARACTERIZACION DE LOS SUELOS DEL MUNICIPIO DE SAN SALVADOR Y ZONAS ALEDAÑAS	219
4.3.1 DESCRIPCION GEOLOGICA DEL A.M.S.S	265

4.3.2 ESTRATIGRAFIA DEL A.M.S.S.	270
4.3.3 SECUENCIA ESTRATIGRAFICA DE SAN SALVADOR	273
4.3.4 IDENTIFICACION DE LAS FORMACIONES	274
4.3.3.1 AREA DE ANTIGUO CUSCATLAN	274
4.3.3.2 AREA DE CENTROS COMERCIALES EL ESPINO	277
4.3.3.3 AREA DEL BOULEVARD ORDEN DE MALTA	280
4.3.3.4 AREA DE LA COLONIA ESCALON	282
4.3.3.5 AREA DE COLONIA SAN BENITO	284
4.3.3.6 AREA DEL MONUMENTO AL SALVADOR DEL MUNDO	286
4.3.3.7 AREA DE CENTRO DE SAN SALVADOR	288
4.3.3.8 AREA DE SAN JACINTO Y CIUDAD DELGADO	290
4.3.3.9 AREA DE SAN ROQUE	292
4.3.3.10 AREA DE CORDILLERA DEL BALSAMO	294
4.3.4 RESUMEN DE VELOCIDADES DE ONDAS P EN S.S	296
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	300
GLOSARIO	313
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	314
ANEXOS	319



## **INDICE DE TABLAS, FIGURAS Y FOTOGRAFIAS.**

### **TABLAS**

#### **CAPITULO II**

Tabla 2.1	Clasificación de Ensayos de Campo para la Exploración del Subsuelo.....	16
Tabla 2.2.	Clasificación de los Ensayos de Laboratorio.....	20
Tabla 2.3	Definición de Constantes Elásticas.....	22
Tabla 2.4	Relaciones entre Constantes Elásticas.....	23
Tabla 2.5	Fases Deposicionales de la Unidad Tierra Blanca Joven. ....	67

#### **CAPITULO III**

Tabla 3.01	Tipos de geófonos.....	81
Tabla 3.02	Descripción de las fuentes de impacto.....	90
Tabla 3.03	Tipos de Explosivos Industriales más Comunes.....	91
Tabla 3.04	Longitud de la línea (metros), según cantidad de canales y separación de geófonos.....	104
Tabla 3.05	Tabla Resumen sobre Valores Típicos o Representativos de Campo de Velocidades de Ondas “P” para Varios Materiales.....	147-148
Tabla 3.06	Clasificación de los materiales, de acuerdo a la velocidad de ondas S que presentan.....	148

Tabla 3.07	Tabla Resumen sobre Valores Típicos o Representativos de Campo de Velocidades de Ondas “S” para Varios Materiales.....	149
Tabla 3.08	Definición de Constantes Elásticas.....	149
Tabla 3.09	Valores Típicos o Representativos de Campo de $\rho$ (densidad) para Varios Materiales.....	150
Tabla 3.10	Valores representativos de la relación de Poisson.....	150
Tabla 3.11	Relación en la Velocidad de Ondas P y el Índice de Fracturación RQD.....	153
Tabla 3.12	Márgenes de Velocidad Sísmica para la Definición de la Ripabilidad en Rocas.....	155
Tabla 3.13	Clasificación del suelo NHERP.....	157
Tabla 3.14	Correlaciones Empíricas entre el Valor “N” del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y la Velocidad de las Ondas Sísmicas de Corte (m/s) para Diferentes Tipos de Suelo y Edades Geológicas.....	158
Tabla 3.15	Clasificación de Suelos en la Normativa Española.....	158
Tabla 3.16	Consistencia de Arcillas y Correlación Aproximada con el Número de Penetración Estándar “N” .....	159
Tabla 3.17	Consistencia de Suelos Arcillosos y Compacidad de Suelos Friccionantes y su Correlación Aproximada con el Número de Penetración Estándar “N”.....	159
Tabla 3.18	Correlación Directa entre el Número de Golpes, la Compacidad Relativa y el Angulo de Fricción Interna del Material.....	160

## CAPITULO IV

Tabla 4.01 Rango de Velocidades para Ondas Compresionales en Suelo y Roca.....	169
Tabla 4.02. Configuración de línea de inspección por refracción.....	180
Tabla 4.03. Cuadro de coordenadas de los puntos utilizados para el trazo y amarre de la línea de inspección realizada en la UES.....	185
Tabla 4.04. Cuadro resumen de los doce valores de tiempo para los primeros arribos de ondas detectados en cada uno de los geófonos.....	191
Tabla 4.05. Cuadro resumen de los doce valores de tiempo para los primeros arribos de ondas detectados en cada uno de los geófonos.....	192
Tabla 4.06. Cuadro resumen de los doce valores de tiempo para los primeros arribos de ondas detectados en cada uno de los geófonos.....	193
Tabla 4.07. Cuadro resumen de los doce valores de tiempo para los primeros arribos de ondas detectados en cada uno de los geófonos.....	194
Tabla 4.08. Resultados de refracción sísmica.....	201
Tabla 4.09. Cuadro resumen de la cuantificación y ubicación del estrato contaminado con orgánico y del estrato suelto.....	208
Tabla 4.10. Cuadro resumen de los valores de “N” no corregidos obtenidos de la Prueba de Penetración Estándar en los dos sondeos realizados.....	208
Tabla 4.11. Cuadro resumen de la simplificación de resultados del sondeo S-1 por Método Kobayashi – Obayashi, según el Tipo de Suelo.....	209

Tabla 4.12. Cuadro resumen de la simplificación de resultados del sondeo S-2 por Método Kobayashi – Obayashi, según el Tipo de Suelo.....	210
Tabla 4.13. Cuadro resumen de la simplificación de resultados del sondeo S-1 por Método Kobayashi – Obayashi, según Valores de “N”.....	211
Tabla 4.14. Cuadro resumen de la simplificación de resultados del sondeo S-2 por Método Kobayashi – Obayashi, según Valores de “N”.....	212
Tabla 4.15. Nomenclatura utilizada para la identificación de los estudios de refracción sísmica realizados en el municipio de San Salvador y zonas aledañas.....	224
Tabla 4.16 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos de San Salvador.....	273
Tabla 4.17 Secuencia estratigráfica geológica de Antiguo Cuscatlán .....	274
Tabla 4.18 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Antiguo Cuscatlán.....	275-276
Tabla 4.19 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Centros Comerciales El Espino.....	277
Tabla 4.20 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Centros Comerciales El Espino.....	278-279
Tabla 4.21 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Boulevard Orden de Malta.....	280
Tabla 4.22 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Boulevard Orden de Malta.....	281



Tabla 4.23	Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Colonia Escalón.....	282
Tabla 4.24	Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Colonia Escalón.....	283
Tabla 4.25	Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Colonia San Benito.....	284
Tabla 4.26	Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Colonia San Benito.....	285
Tabla 4.27	Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área del Monumento Al Salvador del Mundo.....	286
Tabla 4.28	Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de El Salvador del Mundo.....	287
Tabla 4.29	Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Centro de San Salvador.....	288
Tabla 4.30	Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Centro de San Salvador.....	289
Tabla 4.31	Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de San Jacinto y Ciudad Delgado.....	290
Tabla 4.32	Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de San Jacinto y Ciudad Delgado.....	291
Tabla 4.33	Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de San Roque..	292

Tabla 4.34	Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de San Roque.....	293
Tabla 4.35	Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Cordillera del Bálsamo.....	294
Tabla 4.36	Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Cordillera del Bálsamo.....	295
Tabla 4.37	Tabla resumen de los resultados de Velocidad de Ondas P obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el municipio de San Salvador y Zonas Aledañas.....	296
Tabla 4.38	Tabla resumen de los resultados de Espesores de Materiales detectados en Estudios de Refracción Sísmica realizados en el municipio de San Salvador y Zonas Aledañas.....	297

## FIGURAS

### CAPITULO II

Figura 2.01	Pozos a Cielo Abierto ó Calicatas.....	18
Figura 2.02	Dispositivo tipo de un ensayo de columna de resonancia.....	24
Figura 2.03	Ensayo de corte cíclico de torsión.....	25
Figura 2.04	Ensayo de corte cíclico de torsión.....	26
Figura 2.05	Resumen del origen del método de Refracción Sísmica.....	27
Figura 2.06	Grafica que muestra la reflexión y la refracción en un interplano aire-agua.....	37
Figura 2.07	La Propagación de una onda plana en el espacio se describe por la construcción de Huygens. Nótese que el rayo (la flecha horizontal) que representa la onda es perpendicular a los frentes de onda.....	39
Figura 2.08	Se muestra una reflexión interna total de la luz proveniente de la fuente S.....	40
Figura 2.09	Modelo de dos capas, la inferior de mayor velocidad.....	42
Figura 2.10	Propagación de las ondas en un medio de dos capas.....	43
Figura 2.11	Angulo crítico de refracción $\theta_c$ .....	44
Figura 2.12	Método de reflexión sísmica.....	46
Figura 2.13	Ensayo down-hole, disposición detallada de la conexión de cables al geófono triaxial, trigger, equipo de adquisición y amplificador.....	50
Figura 2.14	Esquema del ensayo cross-hole.....	52

Figura 2.15	Esquema de Ensayo MASW.....	56
Figura 2.16	a) Método SAWS b) Arreglo común de receptores con diferente posición de la fuente.....	59
Figura 2.17	Mapa de espesores de Tierra Blanca en San Salvador.....	63
Figura 2.18	Fases Depositionales de la Unidad Tierra Blanca Joven.....	67
Figura 2.19	Resumen de la Historia de Erupciones del volcán San Salvador .....	70
Figura 2.20	Perfil de los depósitos de suelos presentes en San Salvador.....	71

### CAPITULO III

Figura 3.01.	Receptores o Geófonos.....	75
Figura 3.02.	Generación de la onda por impacto sobre el terreno.....	75
Figura 3.03.	Equipo de Adquisición de datos.....	76
Figura 3.04.	Expediente de un registro típico observado en un sismógrafo.....	77
Figura 3.05	Diagrama esquemático del método de refracción sísmico.....	77
Figura.3.06	Esquema de geófono uniaxial (izquierda) y modelo de geófono vertical LNA 102 de alta resistencia a climas extremos (derecha). ....	82
Figura.3.07	Esquema de geófono biaxial (izquierda) y modelo de geófono biaxial (derecha).....	82
Figura 3.08	Sensor triaxial. Cada componente de movimiento de los sensores triaxiales tiene sus respectivos cables de conexión.....	84

Figura 3.09	Modelo de geófono triaxial. Cada componente de movimiento de los sensores triaxiales tiene sus respectivos cables de conexión.....	84
Figura 3.10	Cable de conexión de geófonos.....	85
Figura 3.11	Sismógrafo Oyo Corporation de 24 canales .....	87
Figura 3.12	Sismógrafo Modelo 16s de 12 y 24 canales.....	87
Figura 3.13	Unidad de control y almacenamiento.....	89
Figura 3.14	Martillo y plato de golpe.....	94
Figura 3.15	Sistema de disparo: interruptor de martillo y cable de extensión del trigger.....	94
Figura 3.15	Unidad de control y almacenamiento.....	96
Figura 3.16	Trazo de la línea de inspección en la que se ponen marcas para ubicar c/u de los geófonos y la fuente de energía.....	104
Figura 3.17	Configuraciones utilizadas para la realización de ensayos de Refracción Sísmica, utilizando cuatro puntos de disparo (sismógrafo de 12 canales).....	103
Figura 3.18	Configuraciones utilizadas para la realización de ensayos de Refracción Sísmica, utilizando cinco puntos de disparo (sismógrafo de 24 canales).....	103
Figura 3.19	Ubicación de cable de conexión de geófonos y disparador.....	107
Figura 3.20	Disposición del Equipo para el Ensayo de Refracción Sísmica.....	107
Figura 3.21	Ejemplo del registro obtenido de la fuente de energía para un punto de disparo determinado .....	109

Figura 3.22	Ejemplo de domocrónicas (curvas t-x) obtenidas de mediciones conjugadas.....	111
Figura 3.23	Curvas Tiempo-Distancia para diferentes trayectorias de ondas.....	119
Figura 3.24	Ejemplo de un Sismograma y tipos de arribos detectados.....	122
Figura 3.25	Ley de las velocidades aparentes.....	127
Figura 3.26	Principio de Reciprocidad.....	127
Figura 3.27	Tiempo de intercepto en el origen.....	128
Figura 3.28	Aplicación del principio de paralelismo.....	132
Figura 3.29	Caso Simple de Dos Capas Horizontales, y la Curva t-x.....	131
Figura 3.30	Ejemplo de Interfase inclinada y conceptos de mediciones conjugadas y velocidad aparente .....	137
Figura 3.31	Relación entre la razón “Vp/Vs” y la Relación de Poissón para Tobas.....	151
Figura 3.32	Relación entre la Razón “Vp/Vs” y el Angulo de Fricción Interna, Suelos “MH” y Tobas.....	152
Figura 3.33	Tabla de Simplificación, de acuerdo al Tipo de suelo.....	161

## CAPITULO IV

Figura 4.01	Metodología operativa de la refracción sísmica.....	168
Figura 4.02	Ubicación del parqueo norte de la FIA en el Mapa Geológico de El Salvador.....	172
Figura 4.03	Ubicación de línea sísmica.....	177
Figura 4.04	Configuración utilizada en el ensayo de Refracción Sísmica.....	178
Figura 4.05	Esquema general de la conexión de todos los elementos del equipo utilizado en ensayo de refracción sísmica.....	183
Figura 4.06	Ubicación de los puntos de disparo, geófonos y puntos de amarre utilizados en el trazo de la línea de inspección.....	184
Figura 4.07	Registro sísmico 2531.....	187
Figura 4.08	Registro sísmico 2532.....	188
Figura 4.09	Registro sísmico 2533.....	188
Figura 4.10	Registro sísmico 2534.....	189
Figura 4.11	Detección de primeros arribos en registro sísmico.....	191
Figura 4.12	Detección de primeros arribos en registro sísmico 2532.....	192
Figura 4.13	Detección de primeros arribos en registro sísmico 2533.....	193
Figura 4.14.	Detección de primeros arribos en registro sísmico 2534.....	194

Figura 4.15	Curvas tiempo-distancia línea LR-01.....	195
Figura 4.16	Identificación de estratos.....	196
Figura 4.17	Cálculo de la velocidad (valor inverso de la pendiente) de los tres tramos de la domocrónica 2531.....	197
Figura 4.18	Cálculo de la velocidad (valor inverso de la pendiente) de los tres tramos de la domocrónica 2532.....	198
Figura 4.19	Cálculo de la velocidad (valor inverso de la pendiente) de los tres tramos de la domocrónica 2533.....	199
Figura 4.20	Cálculo de la velocidad (valor inverso de la pendiente) de los tres tramos de la domocrónica 2534.....	200
Figura 4.21	Perfil sísmico línea LR-01, perfil A-B.....	201
Figura 4.22	Esquema de ubicación de los dos (2) sondeos con equipo de penetración estándar en el Parqueo Norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, UES.....	204
Figura 4.23	Perfil estratigráfico de los materiales detectados en los dos sondeos realizados con la prueba de penetración estándar.....	207



Figura 4.24	Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el Municipio de San Salvador y Zonas Aledañas en el Mapa Geológico de El Salvador.....	224
Figura 4.25	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Final Paseo Gral. Escalón, San Salvador.....	228
Figura 4.26	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Calle del Mirador, Colonia Escalón, San Salvador.....	231
Figura 4.27	Perfiles estratigráficos de los materiales detectados en sondeos realizados con la prueba de penetración estándar en las proximidades de la Escuela Militar, San Salvador.....	235
Figura 4.28	Perfiles estratigráficos de los materiales detectados en sondeos realizados con la prueba de penetración estándar en las proximidades de la Escuela Militar, San Salvador.....	236
Figura 4.29	Perfiles estratigráficos de los materiales detectados en sondeos realizados con la prueba de penetración estándar en terreno aledaño a GEVESA, sobre Boulevard Los Próceres, San Salvador.....	241
Figura 4.30	Perfiles estratigráficos de los materiales detectados en sondeos realizados con la prueba de penetración estándar en terreno aledaño a GEVESA, sobre Boulevard Los Próceres, San Salvador.....	242

Figura 4.31	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Terreno ubicado en Zona Rosa, Colonia San Benito, San Salvador.....	243
Figura 4.32	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en carretera Prolongación Orden de Malta y Calle a Huizúcar, San Salvador-Antiguo Cuscatlán.....	244
Figura 4.33	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en terreno aledaño a Centro Comercial La Gran Via, Antiguo Cuscatlán.....	246
Figura 4.34	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en alrededores de Colonia Pinares de Suiza, Santa Tecla.....	248
Figura 4.35	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en alrededores de Colonia Guadalupe, Santa Tecla.....	249
Figura 4.36	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en alrededores de Colonia Las Colinas, Santa Tecla.....	250
Figura 4.37	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en alrededores de Colonia Tierra Verde, Santa Tecla.....	251
Figura 4.38	Barra estratigráfica de los materiales detectados en sondeo realizado con la prueba de penetración estándar en Casa Presidencial, San Salvador.....	252

Figura 4.39	Barra estratigráfica de los materiales detectados en sondeo realizado con la prueba de penetración estándar en Centro Recreativo de P.N.C., Ayutuxtepeque.....	254
Figura 4.40	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en sitio próximo a Seminario San José de la Montaña, San Salvador.....	257
Figura 4.41	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Colonia San Benito, San Salvador.....	258
Figura 4.42	Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Universidad Centroamerica José Simeón Cañas (U.C.A.), Antiguo Cuscatlán.....	262
Figura 4.43	Corte geológico a través del Área Metropolitana de San Salvador.....	298
Figura 4.44	Corte geológico a través del Area Metropolitana de San Salvador.....	299

## **FOTOGRAFIAS**

Fotografía 4.01	Personal de campo requerido para realización de ensayo de refracción sísmica.....	170
Fotografía 4.02.	Vista general del Parqueo Norte de la F.I.A., U.E.S.....	178
Fotografía 4.03	Toma de referencia .....	179
Fotografía 4.04	Ejemplo de trazo de la línea de inspección por refracción.....	180
Fotografía 4.05	Colocación de geófonos.....	181
Fotografía 4.06	Colocación del cable de conexión del disparador o trigger.....	182
Fotografía 4.07	Conexión de los cables de los geófonos y del disparador al Sismógrafo.....	182
Fotografía 4.08	Uso de la fuente de energía.....	187
Fotografía 4.09	Desarrollo de dos sondeos con equipo de penetración estándar en el parqueo norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, U.E.S....	205
Fotografía 4.10.	Muestras de suelo obtenidas de los dos sondeos realizados con el equipo de penetración estándar en el parqueo norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, U.E.S.....	205
Fotografía 4.11	Proceso de preservación de muestras de suelo en recipientes herméticos (bolsas plásticas) para su transporte.....	206
Fotografía 4.12	Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área de San Jacinto y Ciudad Delgado (CD) y en el área del Centro de San Salvador (CT).....	225

Fotografía 4.13	Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área de San Jacinto y Ciudad Delgado (CD) y en el área del Centro de San Salvador (CT).....	225
Fotografía 4.14	Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área del Centro de San Salvador (CT) y en el área de San Roque (SR).....	226
Fotografía 4.15	Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área del Monumento Salvador al Mundo (SM), área de Colonia Escalón (ES) y en el área de Colonia San Benito (S). ....	226
Fotografía 4.16	Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área de Antiguo Cuscatlán (A); en el área del Boulevard Orden de Malta (M), en el área de Centros Comerciales El Espino (E); y área de Cordillera del Bálsamo (B).....	227

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE GRADUACION:

**“APLICACIÓN DEL METODO DE REFRACCION SISMICA PARA  
LA DETERMINACION DE VELOCIDADES DE ONDAS P”**

PRESENTADO POR:

JOSE MANUEL LOPEZ AVALOS  
JULIO ANTONIO MEJIA CARRILLOS  
NÉSTOR DANILO VEGA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

DOCENTES DIRECTORES:

ING LESLY EMIDALIA MENDOZA (CORDINADOR)  
ING. JOSE ANTONIO GONZALEZ MAGAÑA  
ING. LUIS ADOLFO CHORRO.

CIUDAD UNIVERSITARIA, 9 DE ENERO DE 2007

## 1.1 INTRODUCCION

En sitios en los que se pretende desarrollar obras civiles de gran importancia, es necesaria la recopilación de información sobre las condiciones del subsuelo, que sirva como herramienta al ingeniero estructural, al ingeniero geotécnico, al geólogo y al hidrogeólogo para la determinación de parámetros tales como: la estratigrafía del sitio, compacidad del subsuelo de fundación, definición del tipo de cimentación a utilizar y su dimensionamiento, cota de fundación en la que se encuentra el suelo sano y firme, ubicación de yacimientos de rocas sanas y/o alteradas, determinación de fallas, determinación del nivel freático, etc., que derivará en costos en las etapas de movimiento de tierras (terracería) y edificación de obras.

En ciertas ocasiones, el Estudio de Mecánica de Suelos no provee la información suficiente para definir la mayoría de éstos parámetros, por lo cual, es necesario auxiliarse de métodos alternativos, tal es el caso del Método de Refracción Sísmica.

En este documento se presentan los antecedentes previos a la realización de este trabajo de graduación **“APLICACIÓN DEL METODO DE REFRACCION SISMICA PARA LA DETERMINACION DE VELOCIDADES DE ONDAS P”**, el planteamiento del problema, las limitaciones propias, los alcances y objetivos que se pretenden lograr, y la justificación. Así mismo, teoría básica del método de refracción sísmica, estudios realizados de velocidades de ondas P en diferentes lugares de San Salvador para concluir en un rango de velocidades propios de esta zona del país, y algunas recomendaciones que se han obtenido en el transcurso del trabajo de graduación.

## 1.2 ANTECEDENTES

La prospección geofísica es definida como una metodología para la deducción de las condiciones del subsuelo, a través de la observación de fenómenos físicos relacionados con la estructura geológica del mismo. Originalmente, fue desarrollada para la ubicación de yacimientos de petróleo y otros depósitos minerales.

En la Segunda Guerra Mundial, se empezó a utilizar la prospección geofísica para el estudio de terrenos en zonas montañosas (rocosos) para la construcción de represas y túneles. Posteriormente, en la década de 1970, se utilizó para el estudio de suelos blandos, en áreas con suelos de origen aluvial y sedimentario. Actualmente, es empleada en investigaciones para la determinación de la estructura geológica superficial de los suelos.<sup>1</sup>

La prospección geofísica tiene aplicaciones específicas en el campo de la Ingeniería Civil, tal es el caso de los métodos sísmicos (como el de refracción sísmica, microtemblores o microtrepidaciones, cross-hole, down-hole, up-hole, entre otros), que sirven para la realización de estudios de estabilidad y riesgos geológicos (detección de fallas y detección de cavidades), determinación de parámetros dinámicos, determinación de la excavabilidad-ripabilidad en suelo y roca, clasificación geomecánica del subsuelo, etc.<sup>2</sup>

En países, tales como Chile, Colombia, España y Perú, se tienen antecedentes acerca de la utilización del método de refracción sísmica. Se aclara también, que no sólo en ellos se han realizado este tipo de ensayos.

---

<sup>1</sup>Rosales Climent, Cristina (2001). Tesis “Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos del Área del Canaveral, Cali, Colombia”, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.

<sup>2</sup>Rodríguez, Manuel Arlandi (2001). “Geofísica Aplicada a la Obra Civil. Método Geoléctrico y Sísmica de Refracción. Casos Prácticos”. Geoconsult Ingenieros Consultores. Valencia, España.



Para el caso de Chile, en su capital Santiago, la refracción sísmica ha sido utilizada en la realización de estudios en depósitos de cenizas volcánicas y ripios, para proyectos con fines urbanísticos e industriales.<sup>3</sup>

Para el caso de Colombia, la refracción sísmica ha sido utilizada en estudios para la determinación del efecto sísmico local conocido como “efecto de sitio”, en donde se ha evaluado el comportamiento sísmico de los terrenos en el entorno urbano.<sup>1</sup>

Para el caso de España, la refracción sísmica es uno de los métodos más habituales en los trabajos de geología y geotecnia, en donde se utiliza, junto con la tomografía eléctrica, en casi el 90% de los trabajos geofísicos que se desarrollan en el ámbito de los estudios geotécnicos, para la redacción de proyectos de obras lineales (carreteras y ferrocarriles).<sup>2</sup>

Para el caso de Perú, la refracción sísmica se ha utilizado en estudios realizados en minas, para la determinación de perfiles sísmicos, definición del nivel del suelo firme o basamento rocoso y en la identificación de las características de resistencia de los materiales existentes en el depósito investigado.<sup>4</sup>

Finalmente en El Salvador, los métodos sísmicos (especialmente el de refracción sísmica) se han aplicado desde hace algún tiempo, desconociéndose con exactitud la fecha en que fueron realizados los primeros ensayos, ya que han sido efectuados por pocas instituciones de carácter privado (y cuyos resultados no son de manejo público),

---

<sup>3</sup> Ampuero S. Alejandro (1999): “Velocidades de Onda medidas en Santiago con el Ensayo de Refracción Sísmica”, Pontificia, Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.

<sup>4</sup>MSc. Ing. Huamán Egoávil-Bach, Carlos (1999). Programa Científico PC-CISMID “Implementación del Equipo de Adquisición de datos de Prospección Sísmica”, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

debido a causas tales como el alto costo del equipo y el poco conocimiento de los métodos.

Se estima que la aplicación de los métodos sísmicos para fines geotécnicos; inició en nuestro país con el método de reflexión sísmica en el año 1960-1962 en la planta hidroeléctrica de la chorrera del guayabo con motivo de la instalación de la cuarta unidad generadora.<sup>5</sup>

En el año de 1976, se utilizó el método de refracción sísmico para el diseño de la Autopista a Comalapa.<sup>6</sup>

En el año de 1984, se utilizó el método de refracción sísmica para la obtención de propiedades dinámicas de los suelos del Área Metropolitana de San Salvador (A.M.S.S.). La aplicación de este método fue realizada por la empresa Rivera – Harrouch, S.A. de C.V.<sup>7</sup>

En el año de 1988, se realizaron estudios geotécnicos con el método Down-Hole, en algunos municipios del AMSS (San Salvador, Ciudad Delgado, Apopa y Antiguo Cuscatlán) llevados a cabo por la empresa Consorcio Italiano, para la determinación de la velocidad de ondas sísmicas en los 15 metros superiores del estrato de Tierra Blanca,

---

<sup>5</sup>González García, José Alberto (1966). Tesis “Principios de Geofísica Exploratoria, Su Aplicación en los Estudios del Campo Geotérmico de Ahuachapán”. Universidad de El Salvador (U.E.S.). San Salvador, El Salvador.

<sup>6</sup> González, José Antonio.(2007). Entrevista “Estudios Realizados con Refracción Sísmica en El Salvador” CONTECSA. San Salvador, El Salvador.

<sup>7</sup>Linares Elizondo, Roberto (1985). Tesis “Microzonificación Sísmica del A.M.S.S. basada en Observación de Micro-temblores, Espectros de Respuesta y Registros de Sismocópios”. Universidad Centroamericana (U.C.A.). San Salvador, El Salvador.

con el fin de confirmar el efecto amplificador de los movimientos sísmicos a los cuales se ve sometido dicho estrato.<sup>8</sup>

En el año 2003 se realizaron ensayos de refracción sísmica en las actuales instalaciones de Casa Presidencial y del Centro Recreativo de la Policía Nacional Civil (PNC), para la determinación del periodo de respuesta del suelo. La aplicación de este método fue realizada por la empresa Consultora Técnica, en Antiguo Cuscatlán y Ayutuxtepeque, respectivamente.<sup>9</sup>

También, en los años 2003 y 2005, se utilizó la refracción sísmica para el diseño de la Prolongación del Boulevard Orden de Malta - Autopista a Comalapa, así como en el diseño de la Prolongación del Boulevard Diego de Holguín - CA1; los cuales fueron realizadas por la empresa Consultora Técnica.<sup>6</sup>

En el año 2005, se realizó una investigación acerca de la influencia en la interacción dinámica suelo-estructura para un edificio en particular (como lo es el Hotel Real Intercontinental), en la que se utilizó el método de refracción sísmica para la determinación de parámetros dinámicos del suelo que se utilizan en la realización de un modelo para la obtención de la respuesta máxima de la estructura.<sup>10</sup>

Según estudios realizados con el Método Down-Hole, la velocidad de ondas sísmicas en los 15 metros superiores de las capas de suelo, tipo “Tierra Blanca”, es del orden de

---

8

Consorcio Salvador E. Italtেকna, Italconsult (1988): “Informe Geológico + Apéndice” San Salvador Programa di Ricostruzione “Valutazione Della pericolosità sismica nelle aree del distretto Sanitario A3 (San Salvador) e del distretto 7 (Apopa)”. San Salvador, El Salvador.

<sup>9</sup> Estupinián Mendoza, Rubén (2003). Tesis “Investigación de las Propiedades Dinámicas de los Suelos de San Salvador”, Universidad Albert Einstein (U.A.E.). San Salvador, El Salvador.

<sup>10</sup> Chorro, Mauricio René (2006). Tesis “Análisis y Verificación de Interacción Dinámica Suelo-Estructura”. U.C.A. San Salvador, El Salvador.

unos 200 m/s, lo cual indica un suelo bastante blando, que denota un efecto amplificador. Los suelos tipo Tierra Blanca, son los que más predominan en el A.M.S.S. y se clasifican como arenas limosas o limos arenosos muy poco consolidados, cuyo espesor máximo varía entre 30 y 50 metros.

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El análisis del suelo como material de cimentación, a través de un Estudio de Mecánica de Suelos, se ha desarrollado en El Salvador por medio de métodos convencionales de investigación subsuperficial, como por ejemplo, sondeos por medio de hincado de cucharas muestreadoras (S.P.T.), pozos a cielo abierto o calicatas, sondeos mecánicos rotativos, entre otros. Las secciones geológicas del subsuelo, definidas a partir de la interpolación y extrapolación de los sondeos mecánicos ejecutados, muchas veces se traducen en serios problemas durante la etapa constructiva, ya que generalmente el subsuelo es muy heterogéneo y presenta bruscos cambios laterales que no siempre son detectados a través de sondeos, debido a que un sondeo solo es representativo de su eje vertical. Ante estos márgenes de incertidumbre y los frecuentes problemas en importantes obras de ingeniería, los países desarrollados comenzaron a utilizar, cada vez más, los avances tecnológicos de la exploración geofísica, a fin de zonificar, horizontal y verticalmente, todo el subsuelo de interés, antes de proceder a ejecutar los sondeos mecánicos necesarios. Estos ensayos de exploración geofísica son un complemento de los métodos convencionales de exploración del subsuelo para la obtención de información más detallada del mismo

Actualmente existen métodos modernos de exploración geofísica, tales como los métodos sísmicos (Refracción y Reflexión Sísmica, Down-Hole, Up-Hole, Cross-Hole, entre otros) que son utilizados para proveer información relevante sobre las condiciones geotécnicas y geológicas de sitios de interés. Los métodos anteriormente mencionados, se basan específicamente en el análisis de las velocidades de ondas sísmicas, y cuentan con equipos asistidos por software especializados, diseñados para el procesamiento e interpretación de los datos obtenidos de ensayos de campo. Las ventajas que presentan, por citar algunas, son: la reducción del tiempo de ejecución de las pruebas de campo, permiten la prospección de grandes extensiones de terreno, permiten un análisis más detallado del subsuelo cuando se combina con el ensayo de penetración estándar, etc.

Los métodos sísmicos son utilizados en estudios de microzonificación sísmica, estudios de estabilidad y riesgos geológicos (detección de fallas y detección de cavidades), determinación de parámetros dinámicos del terreno, clasificación geomecánica del terreno, zonificación e identificación del subsuelo, determinación de la profundidad hasta la roca base, determinación del grado de calidad y desgarrabilidad (ripeabilidad o ripabilidad) de las rocas, etc., en la que dicha información es de gran utilidad para diferentes áreas de aplicación en la Ingeniería Civil.

En El Salvador, el Método de Refracción Sísmica es el que puede tener mayor aplicación en el área de Ingeniería Civil, por la sencillez en la realización del ensayo, facilidad en el manejo y transporte del equipo, su bajo costo en comparación con otros métodos de exploración geofísica y la información del subsuelo que proporciona dicho ensayo.

El problema consiste en que el Método de Refracción Sísmica es muy poco utilizado en El Salvador, debido a la poca difusión del método, otros problemas son: el elevado costo del equipo, poca demanda de profesionales especializados en la rama de geofísica, recursos limitados para la implementación de una carrera especializada en geofísica dentro de las universidades del país y la falta de exigencia en la aplicación de este tipo de exploraciones para el estudio del subsuelo dentro de la normativa de diseño y construcción de obras civiles.

Con lo anteriormente expuesto, la idea central de este trabajo de graduación se basa en la descripción del método de Refracción Sísmica, la presentación de la metodología para la realización del ensayo, la realización de un ensayo de refracción sísmica y la corroboración de los resultados obtenidos por medio de la realización de sondeos con el Ensayo de Penetración Estándar (S.P.T.) dentro de las instalaciones de la Universidad de El Salvador, la presentación de las ventajas de dicho método, y finalmente poder determinar, en base a datos disponibles de ensayos de refracción sísmica anteriormente realizados en ciertos puntos de San Salvador, el rango de velocidades de las ondas P, para los tipos de suelo más comunes de esta zona del país.

#### **1.4 JUSTIFICACION**

La justificación en la realización de este trabajo de graduación radica en la presentación del método de refracción sísmica como herramienta de gran valor para la Ingeniería Civil, cuyo uso en otros países ha logrado buenos resultados en la determinación de parámetros de diseño que están directamente ligados a la magnitud de las obras a ejecutar

y cuyo uso se pretende promover, debido a que en El Salvador existe muy poca difusión de él por la falta de formación de profesionales en la rama de geofísica por parte de las universidades del país.

Con esta investigación se pretende crear un documento que sirva como base a los profesionales de la Ingeniería Civil para que conozcan la metodología de aplicación del Método de Refracción Sísmica de Ondas P, sus ventajas y desventajas así como su utilidad. Finalmente se pretende conocer el rango de velocidades de Ondas P encontradas en algunos tipos de suelos del municipio de San Salvador a partir de resultados de ensayos de refracción sísmica anteriormente realizados.

## **1.5 OBJETIVO GENERAL**

Aplicar el Método de Refracción Sísmica para la Determinación de Velocidades de Ondas P.

### **1.5.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. Recabar información sobre los fundamentos de la Teoría de las Ondas Sísmicas (específicamente de las Ondas P) y de la Teoría de Refracción de Ondas.
2. Realizar una investigación bibliográfica sobre los métodos de Prospección Sísmica de interés para el área de Geotecnia, específicamente sobre el Método de Refracción Sísmica de Ondas P, la normativa que lo rige, ventajas y desventajas del método, sus aplicaciones y los factores que influyen en el desarrollo del mismo.

3. Describir la metodología para el desarrollo del Método de Refracción Sísmica de Ondas P, según la Norma ASTM D-5777 “Standar Guide for Using the Seismic Refraction method for Subsurface Investigation”
4. Realizar un ensayo con el Método de Refracción Sísmica de Ondas P y un ensayo Penetración Estándar dentro de las instalaciones de la Universidad de El Salvador para determinar el perfil de velocidades de Ondas P.
5. Obtener la clasificación de las Ondas P, con la ayuda de las velocidades de propagación obtenidas de otros ensayos de refracción sísmica que se hayan realizados anteriormente dentro del municipio de San Salvador y en zonas aledañas, y que además, se encuentren disponibles en el tiempo de ejecución de este trabajo de graduación.
6. Poner al alcance del Gremio de Ingenieros Civiles un documento que presente los usos y aplicaciones más importantes del Método de Refracción Sísmica como complemento al estudio de suelos, y a la vez promover su difusión.

## **1.6 ALCANCES**

1. Recopilar información bibliográfica acerca de los métodos de Prospección Geofísica, específicamente de Prospección Sísmica.
2. Recopilar información bibliográfica del método de Refracción Sísmica de Ondas P.
3. Conocer las limitantes, ventajas y desventajas que el método de Refracción Sísmica de Ondas P presenta.



4. Describir la metodología del ensayo, en función de la Norma ASTM D-5777.  
“Standar Guide for Using the Seismic Refraction method for Subsurface Investigation”
5. Establecer el rango de valores de la velocidad de Ondas P en algunas zonas del Municipio de San Salvador.

### **1.7 LIMITANTES**

1. Acceso a información bibliográfica, en idioma castellano, referente al Método de Refracción Sísmica, sus aplicaciones, limitantes, ventajas y desventajas que presenta, relaciones entre los resultados de este método con parámetros mecánicos y dinámicos del suelo, etc.
2. La poca utilización del Método de Refracción Sísmica, por parte de empresas especializadas en la rama de Geotecnia, por la falta de exigencia en la normativa de diseño y construcción de obras civiles para la aplicación de este método en la realización de estudio del subsuelo; el alto costo del equipo y la poca difusión del método.
3. Acceso al equipo para la realización de un ensayo de refracción sísmica en las instalaciones de la Universidad de El Salvador, debido a que dicha institución educativa no cuenta con equipo propio.
4. Acceso a resultados de Estudios de Velocidades de Ondas P con el método de refracción sísmica, que se hayan realizado con anterioridad por empresas especializadas en la rama de Geotecnia.
5. El tiempo disponible para el desarrollo de este Trabajo de Graduación.

## **1.8 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.**

La metodología a seguir para el desarrollo secuencial del presente trabajo de graduación se dividirá de la siguiente forma:

1. Visitas a empresas e instituciones que desarrollan y aplican el Método de Refracción Sísmica en El Salvador, con el objeto de obtener asesoría y apoyo técnico para la realización de esta investigación.
2. Entrevista con ingenieros especialistas en el área de geotecnia y sismología para la obtención de asesorías externas para el desarrollo de este trabajo de graduación.
3. Presenciar la ejecución de ensayos de Refracción Sísmica para observar y aprender la metodología de dicho método, específicamente, los elementos que componen el equipo, la ubicación, instalación y distribución de los mismos, recolección y almacenamiento de datos provenientes de la ejecución de los ensayos, personal de campo para la aplicación del método, el trabajo que se realiza en oficina respecto a la interpretación de los resultados, con auxilio de un software específico y de personal especializado, etc.
4. Recolección de los resultados obtenidos de varios ensayos de refracción sísmica desarrollados en el municipio de San Salvador, con el fin de establecer un rango de velocidades de las Ondas P en los suelos presentes en los sitios donde se realicen dichos ensayos. Esta información será proporcionada por empresas que desarrollan este tipo de pruebas en el municipio de San Salvador.

5. Investigar acerca del Método Refracción Sísmica, en fuentes bibliográficas tales como: tesis de trabajos de graduación, libros, manuales, apuntes de clase de Mecánica de Suelos, Normas ASTM, revistas especializadas de Geofísica y Geotecnia e Internet, para reforzar y ampliar los conceptos relacionados con la aplicación de dicho método.

# **CAPITULO II**

## **2.1 INTRODUCCION.**

El presente capítulo tiene como objetivo la presentación sistemática del Marco Teórico del Trabajo de Graduación Titulado “Aplicación del Método de Refracción Sísmica para la Determinación de Ondas P”, el cual muestra la ubicación del Método de Refracción Sísmica dentro de los métodos utilizados por la Geotecnia para la realización de estudios de exploración del subsuelo.

Las investigaciones con fines geotécnicos realizan dos tipos de ensayos, los cuales son realizados de manera consecutiva y complementaria: Ensayos de Campo y Ensayos de Laboratorio; la finalidad de ambos es la obtención de información acerca de parámetros del suelo.

Los ensayos de campo se dividen, de acuerdo a la obtención de muestra de suelo, en directos e indirectos. Dentro de estos últimos están ubicados los métodos geofísicos, utilizados para la determinación de la estructura geológica superficial de los suelos, por medio de la medición de fenómenos físicos tales como la variación del campo gravitatorio (gravimétrico), el campo magnético (magnético), potencial eléctrico (eléctricos) y velocidades de propagación de ondas (sísmicos). Los métodos sísmicos son los de mayor interés en el desarrollo de este capítulo, siendo los más utilizados: Método Up-Hole, Down-Hole y Cross-Hole; Método de Medición de Ondas Superficiales MASW y SASW; Método de Reflexión y Refracción Sísmica, donde la aplicación de este último es el objeto del desarrollo de esta investigación.

Finalmente se presenta un apartado acerca del origen geológico y composición de los suelos del municipio de San Salvador, en la cual se menciona la definición, origen y

mapa de espesores de Tierra blanca en el municipio de San Salvador así como la composición de los suelos de dicho municipio.

La importancia del desarrollo de este capítulo radica en la presentación del ámbito que rodea al método de refracción sísmica como método de investigación del subsuelo.

## **2.2 EXPLORACION DEL SUBSUELO.**

La geotecnia es la rama de la Ingeniería Civil que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la Tierra. Esta se divide en el estudio de parámetros o propiedades relacionadas a la mecánica de suelos, mecánica de rocas y dinámica de suelos.

Los ingenieros geotécnicos investigan tanto suelos como rocas que se encuentran por debajo de la superficie, con la finalidad de determinar sus respectivas propiedades y con ello, diseñar las cimentaciones para estructuras tales como: edificios, puentes, centrales hidroeléctricas, etc.

La geotecnia realiza dos tipos de ensayos: Ensayos de campo y Ensayos de laboratorio.

### **2.2.1 SONDEOS MECANICOS Y CALICATAS.**

La investigación del subsuelo, consiste en la realización de un programa detallado de ensayos de campo, para la obtención de información sobre las condiciones geológicas de un sitio en particular, la cual será necesaria en las etapas diseño y construcción de obras.

El tipo de ensayo de campo a realizar depende de factores tales como: tipo de proyecto a desarrollar (edificios, carreteras, presas, viviendas, etc.), geología del sitio, tipo de suelo

encontrado, tecnologías disponibles, experiencia del personal técnico en la ejecución de las labores de campo, obtención y traslado de las muestras, entre otros, para la determinación de parámetros del subsuelo.

En la tabla 2.01, se muestra la clasificación de los diferentes métodos de campo para la exploración del subsuelo.

Ensayos de Campo	A. Ensayos Directos	1. Sondeos Mecánicos	a. Sondeos Preliminares	- Método de Penetración Estándar (SPT) - Método de Lavado. - Método de Penetración Cónica.
			b. Sondeos Definitivos	- Método de Pared Delgada Shelby - Muestreo con Tubo Sueco. - Muestreo con Tubo de Pistón. - Muestreo con Tubo Doble Giratorio Denison. - Muestreo Rotatorio para Roca.
		2. Calicatas o Pozos a Cielo Abierto		
	B. Ensayos Indirectos	1. Penetraciones Dinámicas	- Prueba de Penetración Dinámica Súper Pesada(D.P.S.H.) - Borros.	
		2. Ensayos Geofísicos.	a. Método Gravimétrico b. Método Magnético c. Métodos Eléctricos.	
			d. Métodos Sísmicos.	- Método Up-Hole - Método Down-Hole - Método Cross-Hole - Método de Reflexión Sísmica. - Método de Refracción Sísmica. - Método MASW - Método SASW

Tabla 2.01 Clasificación de Ensayos de Campo para la Exploración del Subsuelo.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> García Hermoso, Fernando (2006). “Estudios Geotécnicos” Escuela Politécnica Superior, Huesca, España.

### **2.2.1.1 SONDEOS MECANICOS.**

En nuestro país, el Ensayo de Penetración Estándar (ASTM D-1586) es el método convencional más usado en la realización de sondeos para exploración del subsuelo, debido a su rapidez, economía y porque sus resultados son representativos, sin embargo existe la práctica de utilizar la cuchara muestreadora de este equipo como única herramienta de avance, lo que no está permitido por la Norma. Este ensayo consiste en contar el número de golpes necesarios para hincar 30 cm una cuchara muestreadora, con ayuda de un martillo de 65 Kg que se deja caer de una altura de 75 cm. Básicamente se divide en dos etapas: la perforación de un agujero y la toma de muestra en seco. El método proporciona al final una idea de la resistencia del material.

#### **Ventajas de los Sondeos Mecánicos.**

- Obtención de muestra inalterada en toda la columna.
- Alcanzan grandes profundidades.
- Permite reconocer estratos del terreno bajo el nivel freático.
- Atraviesa capas de roca de alta resistencia.

#### **Desventaja de los Sondeos Mecánicos.**

- Los sondeos son representativos de un punto específico.
- Las secciones geológicas del subsuelo son definidas a partir de la interpolación y extrapolación de sondeos mecánicos ejecutados.
- Los sondeos no siempre detectan cambios bruscos laterales en el subsuelo.
- Dificultad de recobro en suelos demasiado sueltos.



### 2.2.1.2 CALICATAS.

Se considera que este método es el más satisfactorio para conocer las condiciones del subsuelo, ya que consiste en hacer excavaciones en el lugar, hechas manualmente o por medio de maquinaria.

Dichas excavaciones pueden ser de entre 1.5 a 2.0 m de diámetro (si es circular) y de 1.5 m a 2.0 m por lado (si es cuadrada). Tales dimensiones tienen la finalidad de facilitar el acceso para que una persona pueda bajar y examinar los diferentes estratos en su estado natural, con el objeto de obtener información acerca de las condiciones precisas referentes al agua contenida en el subsuelo así como la realización de ensayos “in situ” (ver figura 2.01).

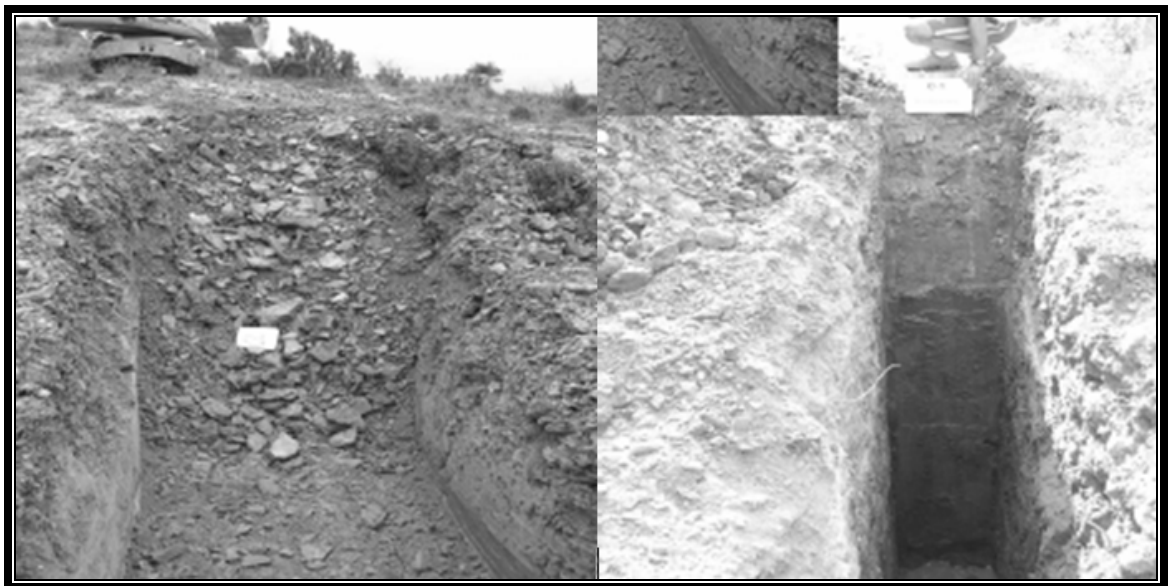


Figura 2.01 Pozos a Cielo Abierto ó Calicatas<sup>11</sup>

**Ventajas de las Calicatas:**

- Facilidad en la obtención de muestras alteradas e inalteradas representativas de las condiciones existentes del sitio en estudio.
- Observación directa y amplia de la estratigrafía del lugar.
- Determinación de las condiciones referentes a la humedad natural del suelo.
- Realización de diferentes ensayos in situ tales
- Rapidez de ejecución.

**Desventajas:**

- Profundidad de reconocimiento limitada
- Materiales necesariamente escarificables con retroexcavadora
- Desmoronamiento en paredes de Calicatas.
- Alteración de las características resistentes del terreno debido al proceso de excavación.
- Presencia de nivel freático

**2.2.2 ENSAYOS DE LABORATORIO.**

Los ensayos de laboratorio son realizados en especímenes que se asumen, serán representativos de una masa mayor de suelo. Los especímenes son ensayados como elementos (estos son sujetos a un esfuerzo uniforme inicial, y una condición de cambio uniforme de esfuerzo o deformación). En otros ensayos de laboratorio, los especímenes son ensayados como modelos, y los resultados deben ser interpretados en términos de la no uniformidad de las condiciones de frontera actuando en el modelo. Los ensayos de

laboratorio usados en la obtención de propiedades dinámicas y mecánicas del suelo se resumen en la Tabla 2.02.

Ensayos de Laboratorio	A. Propiedades Dinámicas	1. Ensayos de Baja Deformación	a. Columna Resonante. b. Pulso Ultrasónico. c. Flector Piezoeléctrico.	Wn, E, D, G  Vs, Vp  Vs
		2. Ensayos de Alta Deformación	a. Triaxial Cíclica. b. Corte Directo. c. Corte Torsional Cíclica	G, D $\tau$ G, D
	B. Propiedades Mecánicas	1. Permeabilidad	a. Permeabilidad b. Granulometría	
		2. Resistencia	a. Triaxial. b. Corte Directo.	
		3. Deformabilidad	a. Límites de Consistencia (Atterberg). b. Consolidación.	

Tabla 2.02. Clasificación de los Ensayos de Laboratorio.<sup>12</sup>

En este documento se presentará un resumen de los ensayos de laboratorio para la determinación de parámetros de interés en la dinámica de suelos, debido a que los mismos son utilizados para corroborar los resultados obtenidos en ciertas aplicaciones de métodos geofísicos (específicamente de los métodos sísmicos) y que servirán para el entendimiento de las propiedades del suelo que influyen en la propagación de las ondas elásticas. Dichos métodos serán presentados en el apartado 2.2.2.1 de este documento.

<sup>12</sup> Campos, Susan (2003): Apuntes de Clases “Clasificación de los Ensayos de Laboratorio”

### **2.2.2.1 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACION DE PROPIEDADES DINAMICAS DE LOS SUELOS.**

#### **Muestreo.**

Para aquellos problemas que involucran la respuesta de suelos a ser utilizados en rellenos, los especímenes deben ser contruidos de muestras brutas o alteradas, simulando el proceso de compactación tan real como sea posible. Cuando la determinación de las propiedades de un suelo es necesaria, el problema se vuelve más complejo. Los ensayos en suelos deben ser realizados en especímenes inalterados o reconstituidos. Aunque, en muchas ocasiones, los resultados serán muy variables entre ambos, debido a las diferencias en la estructura del suelo entre los especímenes, aún cuando las densidades y la aplicación de esfuerzos sean similares.

Por otra parte, la selección de los métodos de ensayos apropiados (tanto de campo como de laboratorio) usados para la determinación de parámetros de interés en la ingeniería requieren de la comprensión del nivel de esfuerzo (directamente relacionado al nivel de deformación) asociado con dichos ensayos. Existe una variedad de ensayos de laboratorio que miden el comportamiento de los suelos sometidos a bajo y alto esfuerzo. El uso de ensayos a un bajo nivel de esfuerzo (con deformaciones unitarias menores a  $10^{-5}$ ) permite el uso de la teoría elástica para asociar las mediciones con propiedades mecánicas y en la cual la mayor parte de la respuesta es lineal. A un nivel de esfuerzo intermedio (con deformaciones unitarias menores a  $10^{-4}$ ), esta respuesta comienza a comportarse como elástico-no lineal. Finalmente, a un mayor esfuerzo (con

deformaciones unitarias mayores a  $10^{-3}$ ) el suelo se comportará como un medio inelástico-no lineal y comenzará a experimentar deformaciones permanentes (plásticas) y eventualmente alcanza una condición inestable.

Los ensayos de laboratorio de interés en la determinación de constantes elásticas en medios isótropos, conocidos también como parámetros dinámicos del suelo (ver tabla 2.03 y tabla 2.04), se dividen en:

- Ensayos de Baja Deformación.
- Ensayos de Alta Deformación.

Nombre	Símbolo	Definición
Módulo de Young ó Módulo de Elasticidad	E	$\frac{\text{Esfuerzo Longitudinal}}{\text{Deformación Longitudinal}}$
Módulo de Corte ó Módulo de Rigidez	G	$\frac{\text{Esfuerzo Cortante}}{\text{Deformación Cortante}}$
Razón de Poisson	$\nu$	$\frac{\text{Deformación Longitudinal}}{\text{Deformación Transversal}}$
Módulo Bulk	K	$\frac{\text{Presión Hidrostática}}{\text{Deformación Volumétrica}}$

Tabla 2.03. Definición de Constantes Elásticas.<sup>13</sup>

<sup>13</sup>Foti, Sebastiano (2000): Thesis PhD Degree in Geotechnical Engineering “Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves”. Politecnico di Torino, Italy.

	$\lambda, \mu$	$G, \nu$	$E, \nu$	$K, G$
$\lambda^*$	$\lambda$	$\frac{2G\nu}{1-2\nu}$	$\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$K - \frac{2}{3}G$
$\mu \equiv G$	$\mu$	$G$	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	$G$
$K$	$\frac{(3\lambda + 2\mu)}{3}$	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$K$
$E$	$\frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$	$2(1+\nu)G$	$E$	$\frac{9KG}{3K + G}$
$\nu$	$\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$	$\nu$	$\nu$	$\frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$

\*: Constante elástica de Lamé

Tabla 2.04 Relaciones entre Constantes Elásticas<sup>13</sup>

### Ensayos de Baja Deformación.

- a) **Ensayo de Columna Resonante:** El ensayo de columna resonante es el ensayo de laboratorio más común para medir la frecuencia fundamental  $\omega_n$  del suelo, la cual es una función de la rigidez de baja deformación del suelo, la geometría del espécimen, y ciertas características del aparato con que se realiza el ensayo (ver figura 2.02).
- b) **Ensayo de Pulso Ultrasónico:** Las velocidades de propagación de ondas pueden ser medidas en laboratorio, mediante ensayos de Pulso Ultrasónico. El pulso ultrasónico es particularmente útil para materiales blandos, como sedimentos marinos, ya que puede ser realizado mientras el suelo se encuentra en el tubo de muestreo.

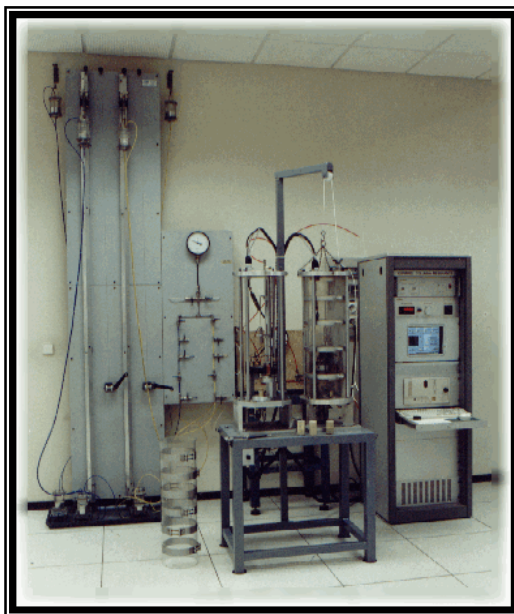


Figura 2.02 Dispositivo tipo de un ensayo de columna de resonancia.<sup>14</sup>

- c) **Ensayo de Flector Piezoeléctrico:** Permite medir la velocidad de onda de corte en especímenes de laboratorio. Un pulso de voltaje es aplicado al elemento transmisor, que causa que se produzca una onda S

### **Ensayos de Alta Deformación.**

A altas amplitudes de deformaciones de corte, los suelos generalmente muestran una tendencia al cambio de volumen. Bajo condiciones de carga drenadas, esta tendencia se ve permitida a manifestarse a sí misma en la forma de deformación volumétrica, pero bajo condiciones no drenadas, esto resulta en cambios en la presión de poros y obviamente, en los esfuerzos efectivos. Ya que el comportamiento del suelo está controlado por los esfuerzos efectivos, todos los métodos de ensayo de suelos a altos

<sup>14</sup> [www.cedex.es](http://www.cedex.es)

niveles de deformación, deben de ser capaces de controlar el drenaje del espécimen y medir los cambios de volumen y presión de poros en forma precisa. El problema de la conformidad del sistema (el volumen cambia debido al aparato de ensayo, más que por el suelo), que puede llevar a errores en el cambio de volumen y medición de presión de poro, es importante en la interpretación de los resultados del ensayo de alta deformación.

- a) ***Ensayo Triaxial Cíclico:*** Es el método mas común en laboratorio para medir las propiedades del suelo bajo cargas estáticas. Y ha sido el ensayo mas usual para medir las propiedades dinámicas del suelo a altas deformaciones (ver figura 2.03).

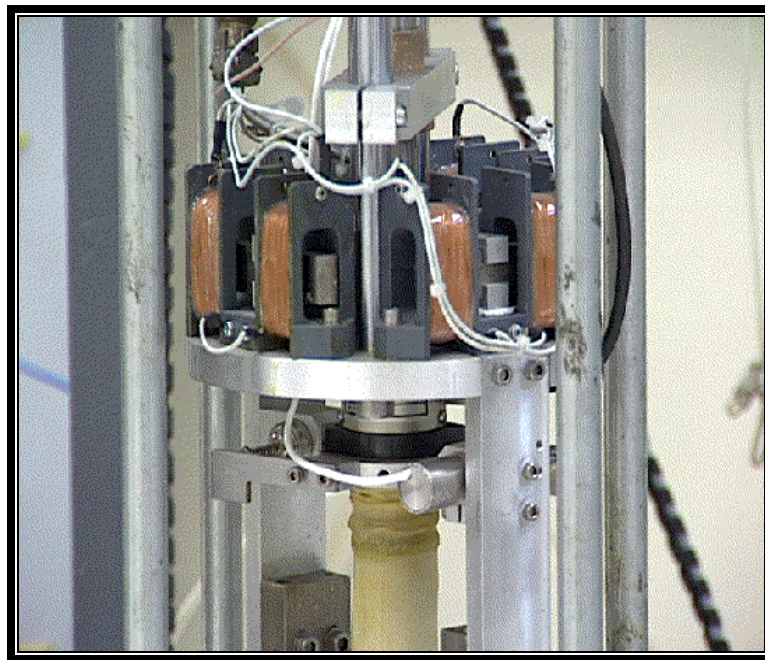


Figura 2.03 Ensayo de corte cíclico de torsión.<sup>14</sup>

- b) ***Ensayo de Corte Directo:*** Este ensayo es capaz de reproducir esfuerzos producidos por terremotos de forma más precisa que el ensayo triaxial cíclico. Su uso más común se enfoca en ensayos de licuefacción (ver figura 2.04).



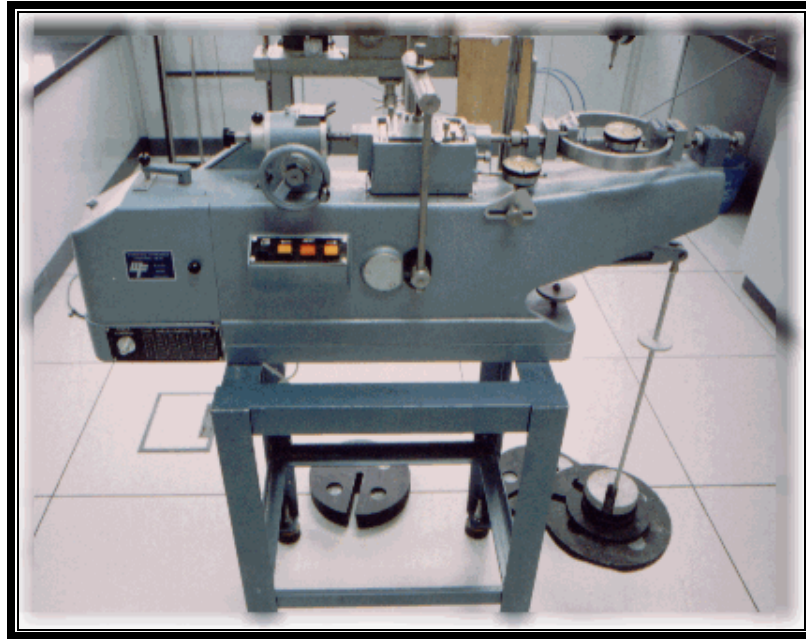


Figura 2.04 Ensayo de corte cíclico de torsión.<sup>14</sup>

c) ***Ensayo de Corte Torsional Cíclico:*** Este ensayo es útil para medir la rigidez y amortiguamiento en un amplio rango de niveles de deformación.

Como resumen del origen del método de Refracción Sísmica se muestra en la figura 2.05

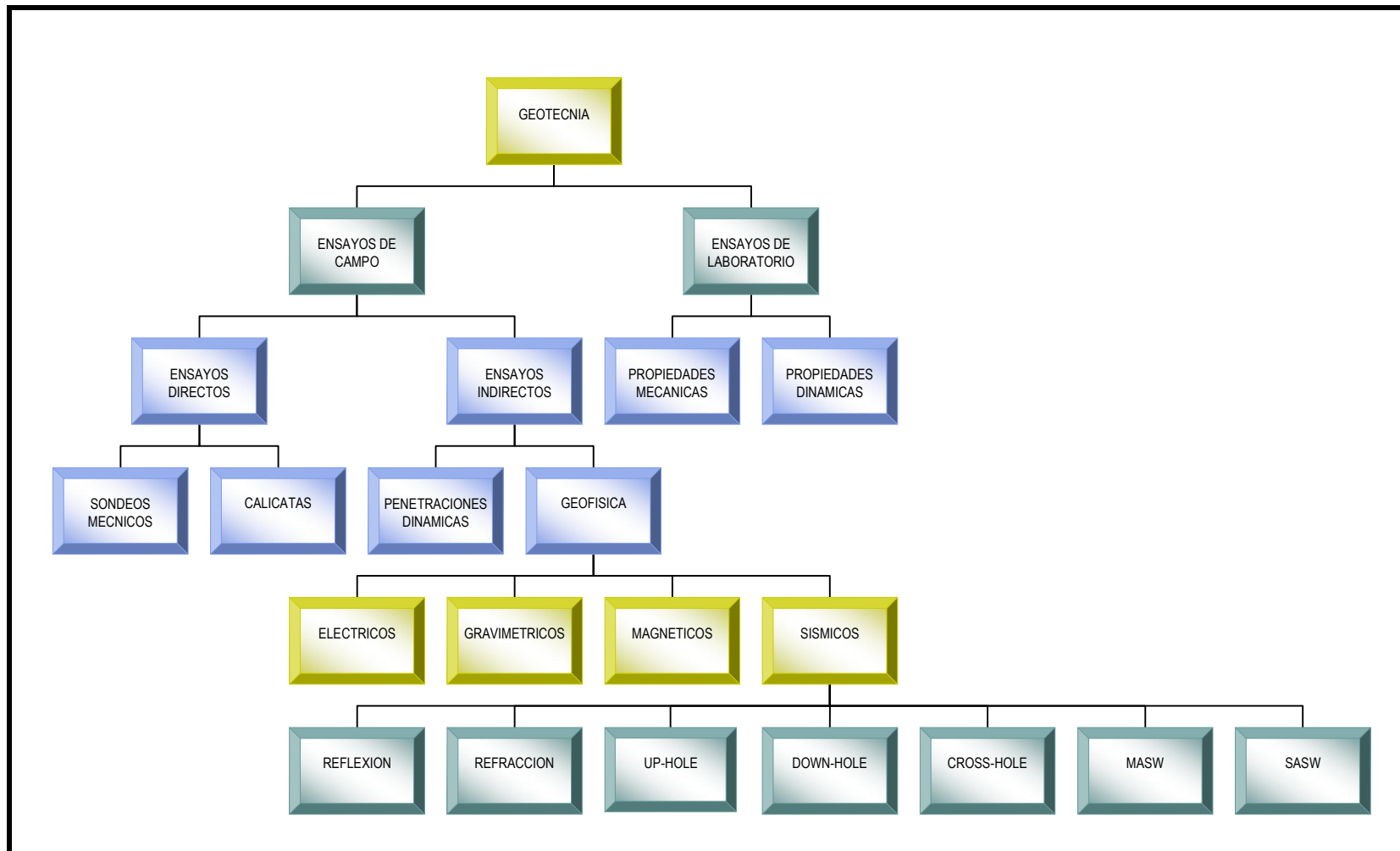


Figura 2.05 Resumen del origen del método de Refracción Sísmica.<sup>11</sup>

## **2.3 METODOS GEOFISICOS DE EXPLORACION.**

### **2.3.1 METODOS GEOFISICOS**

La prospección geofísica es definida como una metodología para la deducción de las condiciones del subsuelo a través de la observación de fenómenos físicos (naturales o artificiales) relacionados con la estructura geológica del subsuelo. Originalmente fue desarrollada como un método efectivo para la prospección del petróleo y otros depósitos de minerales.<sup>1</sup>

Después de la segunda guerra mundial se empezó a utilizar para el estudio de terrenos en zonas montañosas (rocosos) para la construcción de represas y túneles. Posteriormente, en la década 1970, se utilizó para el estudio de suelos blandos, en áreas con suelos de origen aluvial y sedimentario.

Actualmente es empleada en investigaciones para la determinación de la estructura geológica superficial de los suelos.

#### **Objetivo de los Métodos Geofísicos.**

- Determinar propiedades físicas del terreno.
- Determinaciones geológicas como estratigrafía de los materiales.
- Disposición de heterogeneidades, fallas, nivel freático.
- Determinar propiedades de los suelos y rocas para deducir su comportamiento mecánico

Entre los Métodos Geofísicos más utilizados en la actualidad se pueden citar:

- a) Método Gravimétrico.

- b) Método Magnético.
- c) Métodos Eléctricos.
- d) Métodos Sísmicos.

### **2.3.2 METODO GRAVIMETRICO.**

Este método se basa en el estudio de la variación del componente vertical del campo gravitatorio terrestre, y con el cual se realizan mediciones relativas de las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar a otro, puesto que con estas mediciones se puede lograr una precisión satisfactoria, en comparación con las mediciones del campo gravitatorio absoluto.

El método gravimétrico se emplea en hidrología subterránea, como un método de reconocimiento general para la definición de los límites de los acuíferos (profundidad de las formaciones impermeables, extensión de la formación acuífera, naturaleza y estructura de las formaciones del subsuelo), detección de cavidades, relimitación de zonas de relleno o yacimientos arqueológicos.

### **2.3.3 METODO MAGNETICO.**

La tierra es un imán natural que da lugar al campo magnético terrestre. Las pequeñas variaciones de este campo pueden indicar la presencia, en profundidad, de sustancias magnéticas. El método magnético se utiliza para la obtención de información sobre el basamento y ubicación, en profundidad, de dichas sustancias, particularmente para entornos cristalinos y metamórficos. De igual manera, es una herramienta útil para la

realización de estudios de la geología regional y estructural. Este método mide las anomalías del campo magnético y se emplea en investigaciones mineras.

#### **2.3.4 METODOS ELECTRICOS.**

Estos métodos miden los campos de potencial eléctrico, tanto naturales (existentes en la corteza terrestre) como artificiales, utilizando para ello las variaciones de las propiedades eléctricas (resistividad, conductividad, actividad electroquímica o constante dieléctrica), tanto de rocas (minerales) como del agua que rellena sus poros.

Los métodos eléctricos se emplean como métodos de reconocimiento y de detalle, en la investigación de aguas subterráneas. Los mapas de isoresistividad obtenidos a partir de ellos, permiten definir los límites del acuífero, el nivel del agua en los acuíferos, la presencia de agua salada y permite la cartografía de las unidades litológicas.

#### **2.4 METODOS SISMICOS.**

Se basan en la medición de variaciones de velocidad de propagación de ondas de choque, producidas de forma natural (sismos) o artificial (por un impacto en el suelo o por una explosión), con los cuales se puede obtener una imagen aproximada de la estratigrafía del terreno.

Los métodos sísmicos más utilizados son: Método Up-Hole, Down-Hole y Cross-hole; Método de Medición de Ondas Superficiales MASW y SASW; Método de Reflexión y Refracción Sísmica; los cuales se fundamentan en la teoría de ondas. Así mismo, se aclara que la ley de Snell, el principio de Fermat y el principio de Huygens son

utilizados para el desarrollo de los métodos que se basan en la refracción y reflexión de ondas.

La Teoría de Ondas y los métodos sísmicos antes mencionados, serán presentados a continuación.

#### **2.4.1 FUNDAMENTO TEORICO DE ONDAS.**

El movimiento ondulatorio puede considerarse como un transporte de energía y cantidad de movimiento, desde un punto del espacio a otro, sin transporte de materia. Las ondas se clasifican en dos categorías: viajeras y estacionarias. En las primeras hay propagación de energía mientras que en las segundas, la energía asociada a la onda permanece confinada entre dos fronteras.<sup>1</sup>

En la trayectoria de un frente de ondas se distinguen dos aspectos:

1. El movimiento de la onda a través del medio y,
2. El movimiento oscilatorio de las partículas del medio.

##### **2.4.1.1 PARAMETROS PARA LA DESCRIPCIÓN DE ONDAS**

Los parámetros que se usan para describir una onda son: la frecuencia,  $f = 1/T$ , y la frecuencia angular,  $\omega = 2\pi/T$ , donde  $T$  es el período ; y el número de onda,  $\kappa = 2\pi/\lambda$ , donde  $\lambda$  es la longitud de la onda.

##### **2.4.1.2 ONDAS ELÁSTICAS**

La sacudida del terreno producida de manera natural (sismo) o artificial (golpe o explosión), generan 2 tipos de ondas elásticas que se propagan a través del medio:

1. Las ondas de cuerpo o de volumen, y
2. Las ondas superficiales.

La velocidad de propagación depende de la *densidad del medio* y de sus propiedades elásticas, el *módulo de incompresibilidad* y *módulo de rigidez*. Las ondas elásticas generan fuerzas y deformaciones que obedecen la teoría de la elasticidad, en la cual los cuerpos sólidos tienen la propiedad de resistir cambios de tamaño o de forma, y de regresar a la condición no deformada cuando se eliminan las fuerzas externas.

### **Ondas de Volumen.**

Se llaman así porque estas tienden a viajar a través del interior del planeta (adentrándose incluso a grandes profundidades). Dentro de esta categoría se encuentran las ondas Primarias y las ondas Secundarias.

- a. **Primarias o de compresión (ondas P):** Son las que se propagan a mayor velocidad, por lo que a cualquier distancia respecto a la fuente de ondas, serán las primeras en ser registradas. Estas al propagarse, hacen vibrar las partículas en el mismo sentido del tren de ondas, produciendo compresión y dilatación a su paso. Son conocidas también como ondas longitudinales. Ondas acústicas (presentes en fluidos como el agua y el aire) pertenecen a este tipo de ondas.
- b. **Secundarias o de cortante (ondas S):** Hacen vibrar las partículas en sentido perpendicular al tren de ondas. Su velocidad es más baja respecto a la de ondas P en materiales sólidos. Si las partículas oscilan de arriba a abajo, la onda se llama SV, si las partículas oscilan en un plano horizontal se llaman SH. También

son conocidas como ondas transversales. Las ondas S se diferencian de las ondas P, debido a que las primeras poseen una mayor amplitud que las segundas; es por ello que las Ondas S transportan la mayor cantidad de energía generada por la fuente de una sacudida.

Este tipo de ondas solo puede viajar en materiales que poseen esfuerzo cortante, lo que indica que no se presentan en líquidos ni gases.

La velocidad de propagación de las ondas P y S depende de la densidad y de las propiedades elásticas del medio en que se propagan.

### **Ondas Superficiales.**

Este tipo de ondas viajan a lo largo de la superficie de la Tierra y no tienden a adentrarse a capas profundas. Dentro de esta categoría se encuentran las ondas Love y las ondas Rayleigh.

- a. **Love (ondas L):** Se propagan de forma similar que las ondas S haciendo vibrar las partículas horizontalmente en sentido perpendicular al de propagación, pero sin movimiento vertical.
- b. **Rayleigh (ondas R):** Tienen un movimiento similar al de las ondas S en la superficie del agua, haciendo vibrar las partículas sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimientos elíptico horizontal y vertical simultáneamente.

Las ondas L y R solo se propagan en discontinuidades de impedancia.



### **2.4.1.3 FENÓMENOS EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS.**

La propagación de ondas (cualquiera sea su naturaleza: mecánicas, electromagnéticas, etc.) puede ser explicada mediante el concepto de “rayo”, el cual es una simplificación, de gran utilidad en la óptica geométrica, que se basa en los principios de Snell, Huygens y Fermat. Este concepto es utilizado para analizar trayectorias de ondas, como en el caso de la sismica de refracción, en la que la propagación e interacción de éstas con medios de propiedades variables (por ejemplo, suelo y roca) se simplifica al hacer el seguimiento a los rayos que sufren los efectos de reflexión y refracción en las diferentes interfaces.

Cuando el medio en que se propagan las ondas sísmicas no es homogéneo, se producen los fenómenos de difracción, dispersión y scattering.<sup>1</sup>

#### **Difracción.**

Es el desvío de los rayos en cierta extensión, ocurrido cuando se limita parte del frente de ondas (por ejemplo, la desviación de la luz en torno a un obstáculo como la orilla de una rendija). Este fenómeno posee efectos pequeños y se requiere de observaciones cuidadosas para verlos.<sup>1</sup>

#### **Dispersión.**

Es la variación de la velocidad de una onda con el cambio de frecuencia. En un medio elástico homogéneo no hay dispersión, pero si la hay en un medio imperfectamente elástico como en la tierra. En refracción sísmica no hay evidencia de que exista dispersión apreciable, excepto cuando se usan explosivos en inmediaciones de la explosión.<sup>1</sup>

### **Scattering.**

Corresponde a la formación de pequeñas ondas que propagan la energía en todas las direcciones. Se produce cuando un frente de ondas choca con partículas libres u objetos pequeños comparados con su longitud de onda. Este fenómeno es menor para un medio con frecuencias altas.

Parte de lo que se considera “ruido” en un registro puede ser atribuido a este fenómeno, ya que produce energía distribuida al azar en una superficie.

La disminución de la energía sísmica, causada por los tres fenómenos explicados anteriormente, va acompañada de pérdidas debidas a la absorción de la energía, produciendo *amortiguamiento*. Cuando el impulso sísmico viaja a través de las diferentes capas, las altas frecuencias son absorbidas más rápidamente que las bajas frecuencias.<sup>1</sup>

#### **2.4.1.4 LEY DE SNELL.**

En la *figura 2.06* se muestra un haz de luz que incide sobre una superficie plana, el cual se refleja y se dobla (esto es, se refracta). En esta figura, el haz incidente queda representado por una línea, que es el rayo incidente, paralela a la dirección de propagación. Se supone que el haz incidente es una onda plana cuyos frentes de ondas son perpendiculares al rayo incidente. Así mismo, los haces reflejado y refractado se representan por rayos. Los ángulos de incidencia ( $\theta_1$ ), de reflexión ( $\theta_1'$ ), y de refracción ( $\theta_2$ ) se miden entre la normal a la superficie y el rayo correspondiente, tal como se muestra en la figura.

Las leyes que gobiernan la reflexión y la refracción pueden obtenerse de los hechos experimentales:

1. Los rayos reflejado y refractado se encuentran en el plano formado por el rayo incidente y la normal a la superficie en el punto de incidencia; esto es, el plano de la figura 2.06 .
2. En la reflexión:

$$\theta_1 = \theta_1' \quad \textbf{Ecuación 2.1}$$

3. En la refracción:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = n_{21} \quad \textbf{Ecuación 2.2}$$

donde  $n_{21}$  es una constante llamada “índice de refracción del medio 2 con respecto al medio 1”. Este varía con la longitud de onda. Debido a ello, la refracción, al contrario de la reflexión, puede utilizarse para analizar la luz en sus longitudes correspondientes de ondas componentes.

La ley de refracción se conoce con el nombre de ley de Snell o ley de Descartes. Las ondas sísmicas tienen un comportamiento similar, regido por esta ley.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Halliday, David – Resnick, Robert (1982): “Física parte 2.”. Tercera Edición en Español.

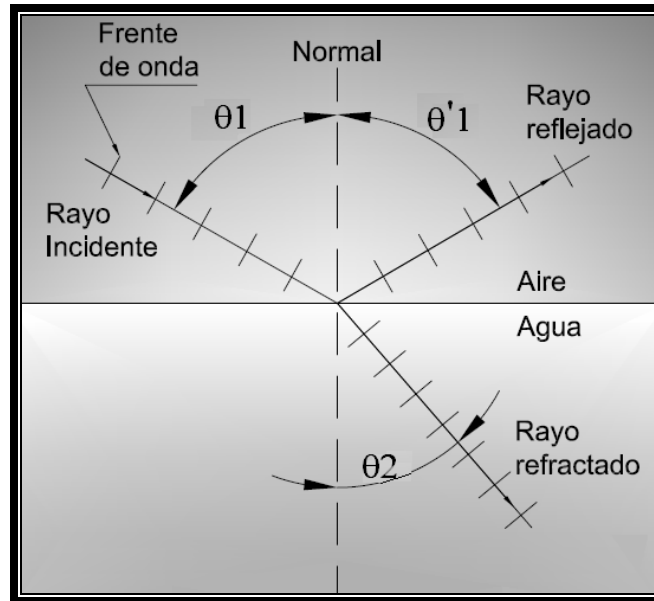


Figura 2.06 Grafica que muestra la reflexión y la refracción en un interplano aire-agua.<sup>15</sup>

#### 2.4.1.5 PRINCIPIO DE HUYGENS.

Esta teoría supone simplemente que la luz es una onda en vez de un rayo de partículas. Huygens no sabía si la luz era una onda transversal o longitudinal; tampoco conocía las longitudes de onda de la luz visible; su conocimiento de la rapidez de la luz era muy limitado.

La teoría de Huygens está basada en una construcción geométrica, llamada el *Principio de Huygens*, que permite determinar la posición de un frente de onda en un tiempo futuro, si se conoce su posición presente; este principio dice:

*“todos los puntos en un frente de onda pueden considerarse como fuentes puntuales que producen ondas esféricas secundarias. Después de un tiempo  $t$ , la nueva posición del frente de onda será la superficie tangente a estas ondas secundarias.”*<sup>15</sup>

Dado un frente de onda (línea ***a-b*** en la figura 2.07), de una onda plana en el espacio. Siguiendo el Principio de Huygens, se considera que algunos puntos de esta onda plana (véanse los puntos de la figura 2.07 en línea a-b) actúan como centros de ondas esféricas secundarias. En el tiempo  $t$ , el radio de estas ondas esféricas es ***ct***, en donde ***c***, es la rapidez de la luz en el espacio vacío. El plano tangente a estas esferas en el tiempo  $t$  está representado por la línea ***d-e***. Como era de esperarse, resulta un plano paralelo al ***a-b***, el cual se encuentra a una distancia perpendicular  $\lambda = ct$  del mismo (donde  $\lambda$  es longitud de la onda). Por consiguiente, los frentes de onda planos se propagan como planos, con una rapidez ***c***. Nótese que el método de Huygens prescribe una construcción tridimensional y que la figura 2.07 es la intersección de esta construcción con el plano de la página.

En la figura 2.08 se muestran rayos luminosos que viajan en un medio óptico denso e inciden sobre una superficie plana al otro lado de la cual existe un medio óptico menos denso. A medida que el *ángulo de incidencia*  $\theta_1$ , se llega a una situación (véase ***rayo e***) para la cual, el rayo refractado apunta a lo largo de la superficie; esto es, que el ángulo de refracción es de  $90^\circ$ . Cuando el ángulo de incidencia es mayor que este ángulo crítico ( $\theta_c$ ), no existe rayo refractado y se habla entonces de un fenómeno llamado “reflexión interna total”.

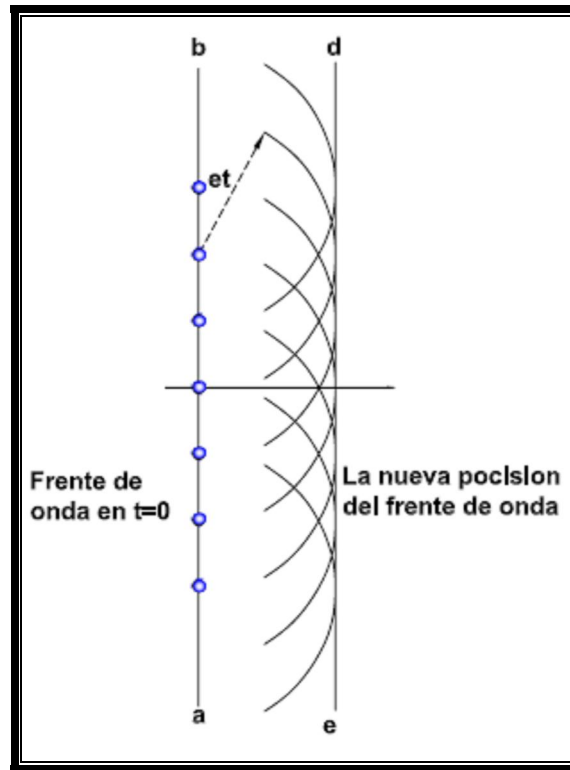


Figura 2.07 La Propagación de una onda plana en el espacio se describe por la construcción de Huygens. Nótese que el rayo (la flecha horizontal) que representa la onda es perpendicular a los frentes de onda.<sup>15</sup>

El ángulo crítico se obtiene haciendo  $\theta_2 = 90^\circ$  en la ley de la refracción

$$n_1 \times \text{sen} \theta_c = n_2 \times \text{sen} 90^\circ$$

$$\text{sen} \theta_c = n_2 / n_1 \quad \textbf{Ecuación 2.3}$$

Donde:

$n_1$  : índice de refracción del medio 1

$n_2$  : índice de refracción del medio 2

La *reflexión interna* total no puede ocurrir cuando la luz u onda viaja inicialmente en un medio de menor índice de refracción.

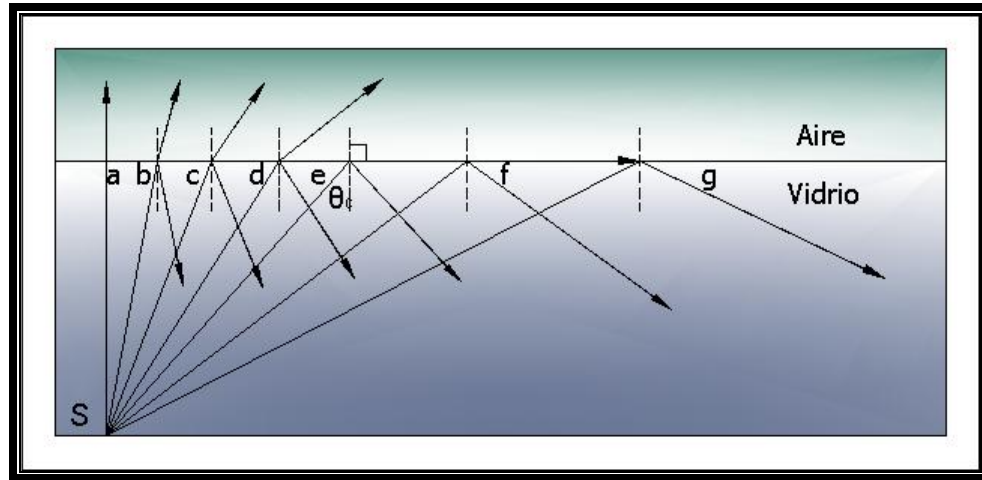


Figura 2.08 Se muestra una reflexión interna total de la luz proveniente de la fuente S; el ángulo crítico es  $(\theta_c)$ <sup>15</sup>

#### 2.4.1.6 PRINCIPIO DE FERMAT.

En 1650, Pierre Fermat descubrió un notable principio que puede expresarse en los términos siguientes: “Un rayo luminoso que viaja de un punto a otro seguirá una trayectoria tal que, comparada con trayectorias vecinas, el tiempo empleado en recorrerla es mínimo, máximo o invariable (es decir, estacionario).”<sup>15</sup>

#### 2.4.2 METODO DE REFRACCION SISMICA.

Es un método de prospección general, especialmente adaptado para trabajos de Ingeniería Civil. Se utiliza para la medición de espesores de recubrimiento, profundidad de nivel freático, prospección petrolera y en la realización estudios hidrogeológicos. Este método permite la localización (profundidad del sustrato), posición del acuífero bajo ciertas condiciones, así como la caracterización de suelos.

Las leyes que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas en la refracción, son las mismas que se utilizan en óptica:

1. Principio de Huygens.
2. Principio de Fermat.
3. Ley de Snell.

Como consecuencia del Principio de Huygens y del principio de Fermat, la ley de Refracción dice que el seno del ángulo incidente es al seno del ángulo de refracción como la velocidad de la onda incidente es a la velocidad de la correspondiente onda refractada.

Para explicar la trayectoria de las ondas en el método de la refracción sísmica, se considera un medio, con velocidad  $V_1$ , que suprayace un medio semi-infinito, con velocidad  $V_2$ , mayor que  $V_1$  (Figura 2.09). Una vez se han generado las ondas en la fuente de las mismas, éstas empiezan a viajar por el medio superior conformando unos frentes de onda en el espacio.



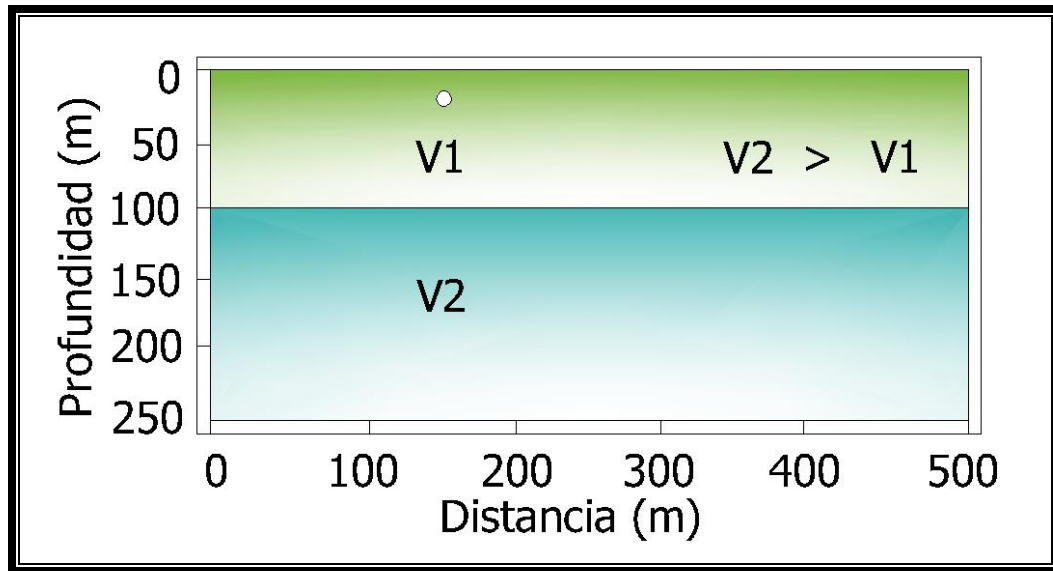


Figura 2.09 Modelo de dos capas, la inferior de mayor velocidad.<sup>1</sup>

Al hacer un corte vertical por la fuente de ondas, el frente de ondas luciría como se ilustra en la parte a) de la figura 2.10. Dicho frente se conocen como *frente de ondas directas*. En la parte b) de la figura 2.10, el frente de ondas se ha encontrado con el límite de los medios y ocurren las primeras refracciones hacia la capa inferior. En la parte c), ha pasado más tiempo y se pueden observar claramente 3 frentes de onda: 1. de las *ondas directas*; 2. de las *ondas refractadas* hacia la capa inferior, y 3. de las *reflejadas* hacia la capa superior.

Al observar en detalle, puede identificarse un cuarto frente de ondas. El frente refractado hacia la capa inferior, no tiene una curvatura constante, de tal manera que corresponde a dos frentes de onda, el que se refracta hacia abajo, y el que se refracta hacia la capa superior. Como se puede observar, este último frente está más alejado de la fuente de

origen de las ondas que el frente de ondas directas en la primera capa, por lo que llegará más rápido a los receptores donde aún no había llegado el frente de ondas directas.

En la parte d) de la Figura 2.10, ha pasado aún más tiempo desde el momento en que se originaron las ondas, y los 4 frentes de onda se diferencian claramente.

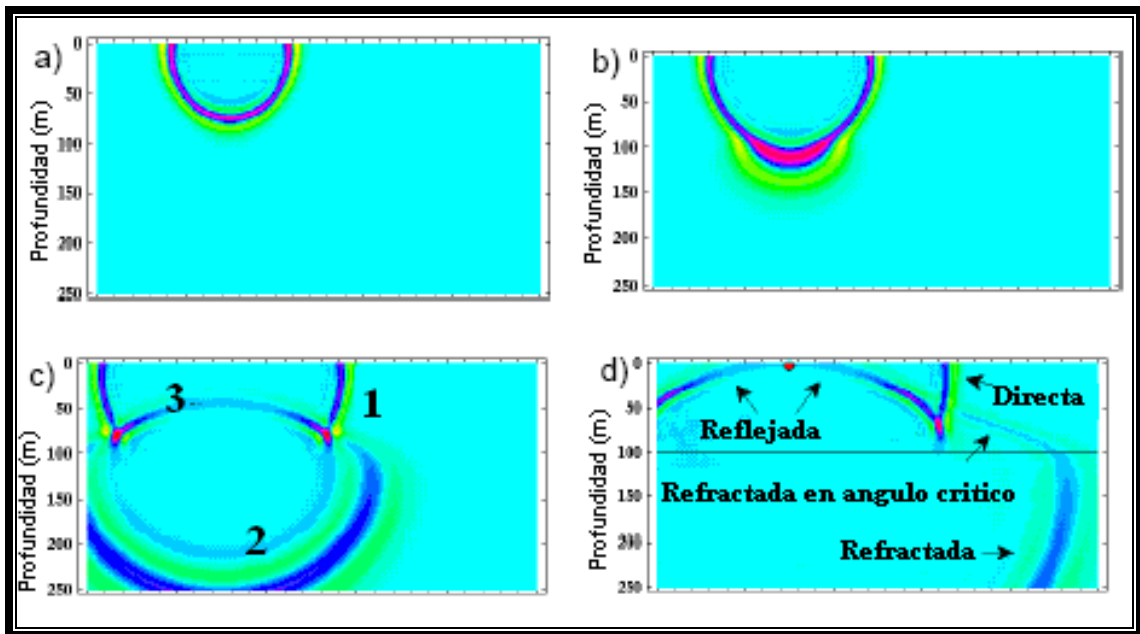


Figura 2.10 Propagación de las ondas en un medio de dos capas.<sup>1</sup>

El frente de ondas refractadas hacia el medio superior se generará cuando los rayos provenientes de la fuente alcanzan un *ángulo crítico*,  $\theta_c$ , en la interfaz entre los medios. Como se explicó en el Principio de Huygens, el ángulo refractado tiene  $90^\circ$  con respecto a la normal, de tal manera que el  $\sin \theta_2 = \sin(90^\circ) = 1$

La refracción a  $90^\circ$  del ángulo crítico, ilustrada en la Figura 2.11, implica que las ondas no se propagan por la capa inferior, sino por el contacto entre ambas capas (es decir por

la superficie de refracción) con la velocidad  $V_2$  de la capa inferior, siguiendo la ley de los recorridos mínimos o Principio de Fermat.<sup>1</sup>

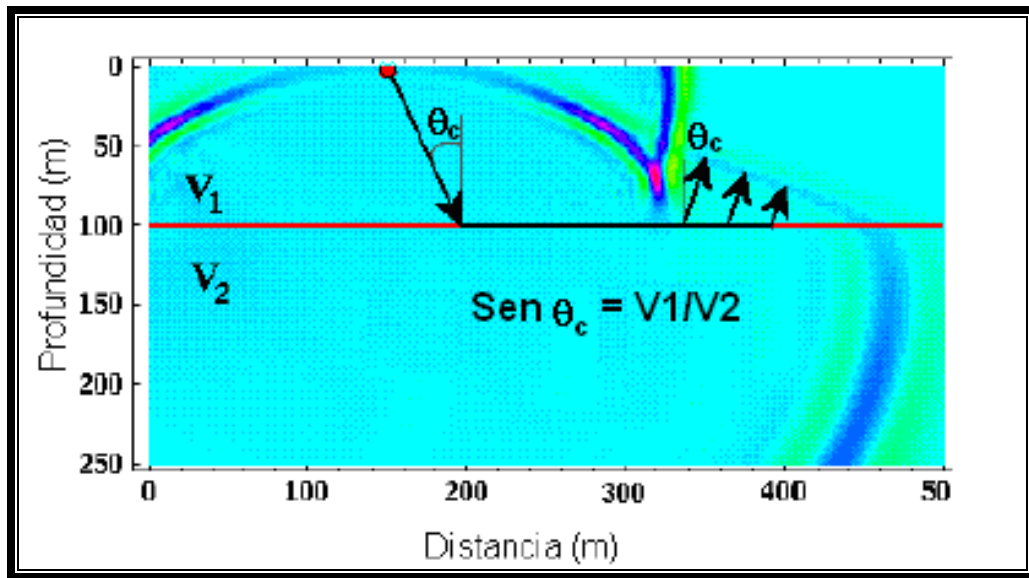


Figura 2.11 Ángulo crítico de refracción  $\theta_c$ .<sup>1</sup>

### 2.4.3 METODO DE REFLEXION SISMICA.

Es uno de los métodos más empleado en la investigación de formaciones rocosas, prospección petrolífera (tanto en tierra como el océano) e hidrogeología, ya que permite la obtención de información de capas muy profundas para la cuantificación de depósitos de roca y petróleo, determinación de límites (hasta 100 m. de profundidad), saturación (contenido de agua) y porosidad de un acuífero, así como en la localización de saltos en fallas geológicas. En la actualidad, su uso está siendo recientemente renovado para la investigación depósitos superficiales de suelo.

Cuando una onda de cuerpo atraviesa la frontera entre dos medios de diferente rigidez, la dirección de propagación de la misma sufre una deflexión de acuerdo con la ley de Snell. Si el *ángulo de incidencia*  $\theta_1$ , es menor que un *ángulo crítico*  $\theta_c$ , la onda es refractada y se propaga en el segundo medio con un ángulo  $\theta_2$ , ( $\theta_2 > \theta_1$ ), donde se asume que la onda viaja más rápido en el segundo medio. Si la onda *incidente* llega a la frontera con un ángulo mayor que  $\theta_c$ , la onda es reflejada en el primer medio con el mismo ángulo  $\theta_R$  respecto a la vertical.

El Ensayo de Reflexión toma ventaja de la reflexión de la onda P, la cual es la onda más veloz y la más fácil de identificar en un punto de monitoreo en la superficie. En este ensayo, (ilustrado en la figura 2.12) se monitorea el *tiempo de llegada*  $t_d$  de la onda P que viaja directamente desde la *fuerza* A hasta puntos tales como B', C', o D'. Esta onda es denominada la *onda directa*. La velocidad de propagación  $V_1$  de la superficie del estrato es calculada como:

$$V_1 = \frac{x}{t_d} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde  $x$  es la distancia entre los puntos A y B', C', ó D'. La otra trayectoria está compuesta del rayo que va desde la fuente A hacia los puntos B, C, ó D, en la frontera y el retorno de este rayo hacia la superficie en B', C', ó D'. El *tiempo de viaje* Tr a lo largo de esta trayectoria está dado por:

$$Tr = \frac{\sqrt{x^2 + 4.H^2}}{V_1} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

donde  $H$  es el espesor del estrato superficial. En el campo, el receptor es trasladado sobre la superficie desde el punto  $B'$  hasta el punto  $D'$  y se establece una *curva de tiempo de viaje versus distancia*.

El espesor del estrato superficial puede ser determinado con respecto al valor de  $V_1$  dado por la ecuación 2.4.

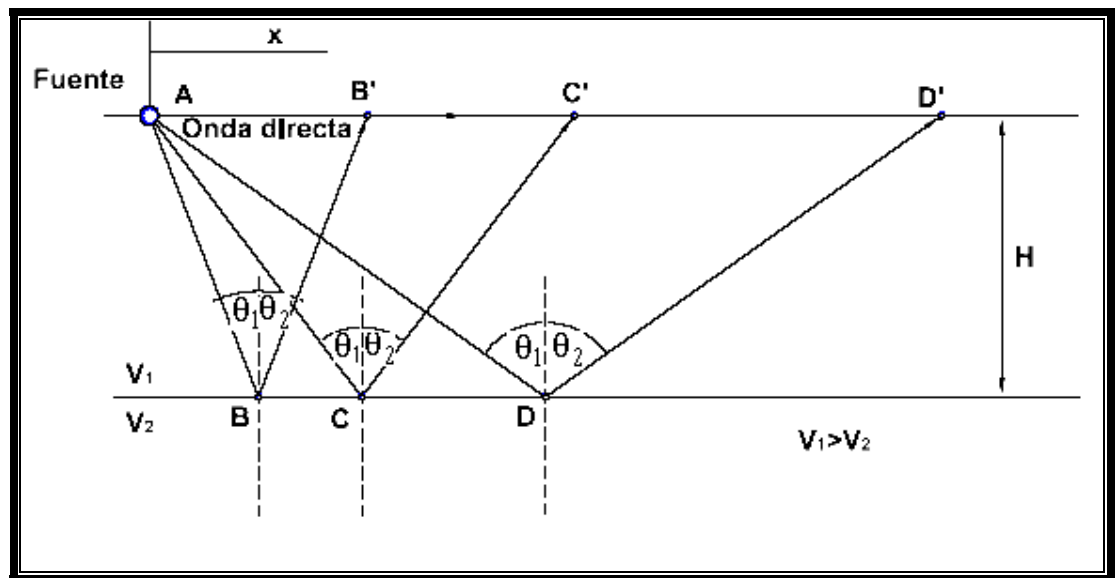


Figura 2.12 Método de reflexión sísmica.<sup>16</sup>

Una de las limitaciones que este método presenta radica en el hecho de que la onda P reflejada siempre arriba al receptor después de la onda directa, por lo que es, usualmente, difícil distinguir con claridad el tiempo exacto de llegada de la onda reflejada.

<sup>16</sup> [www.gestodedios.com](http://www.gestodedios.com)

#### **2.4.4 MÉTODOS DE EXPLORACION EN POZOS (BORE-HOLE).**

Estos métodos son utilizados para el registro y análisis de mediciones realizadas en pozos, y que se utilizaran en la determinación de propiedades físicas y químicas de suelos y rocas. Algunos de los objetivos de los métodos de exploración en pozos son: la identificación de la litología y su correlación estratigráfica; medición de la porosidad, permeabilidad, densidad bulk y propiedades elásticas; caracterización de fracturas y porosidad secundaria; determinación de la calidad del agua subterránea, identificación de pequeños depósitos de contaminantes; y la verificación en la construcción de pozos.

Los métodos más importantes de exploración en pozos son: Método Up-Hole, Down-Hole y Cross-Hole.

##### **2.4.4.1 METODO UP-HOLE.**

Este método se basa en la medición de tiempos de viaje de ondas longitudinales o de corte, propagándose verticalmente en depósitos de suelo, dentro de un pozo.

El método Up-Hole consiste en generar ondas en un punto del pozo y monitorear su arribo a la superficie. Generalmente se utilizan explosivos como fuente generadora ondas de corte (ondas S) y ondas longitudinales (ondas P) de manera simultánea. Las llegadas de estas dos ondas son monitoreadas por varios receptores (geófonos) instalados en un arreglo en la superficie del terreno.

En depósitos de suelo con rigidez en el rango de baja a media, la propagación de las ondas P es suficientemente más rápida que las ondas S y, por lo tanto, el arribo posterior de la onda S puede ser distinguido en el registro monitoreado. En el caso de suelos

rígidos y rocas, la diferencia en la velocidad de propagación de estas dos ondas no es tan pronunciada y resulta difícil distinguir la señal de la llegada de las ondas S.

Algunas de las limitaciones que presenta este ensayo son: el grado de alteración del suelo cuando se realiza el sondeo, posibles efectos de fluidos en el sondeo, excesivo o insuficiente impulso, efectos de ruido sísmico y efectos del nivel freático. Así mismo, la expansión geométrica y el amortiguamiento pueden influir en las longitudes de onda y por tanto, las velocidades de las ondas S pueden tener una interpretación incorrecta para profundidades superiores a 30-60 m.<sup>10</sup>

#### **2.4.4.2 MÉTODO DOWN-HOLE.**

En el caso del método Down-Hole, un receptor (geófono o hidrófono) es adherido a la pared de un sondaje, como se ilustra en la Figura 2.13, para la medición de los tiempos de viaje de las ondas sísmicas propagándose hacia abajo, a partir de la fuente ubicada en la superficie del terreno. El receptor es instalado sucesivamente a las profundidades deseadas, mientras se genera la onda para cada profundidad en la superficie. La fuente utilizada para la generación de ondas suele ser una placa de madera firmemente adherida a la superficie y golpeada manualmente por un martillo. Si la placa es golpeada horizontalmente, generará una onda de corte directa en la dirección horizontal. La onda longitudinal (onda P) es generada golpeando la placa verticalmente o dejando caer un peso sobre ésta.

Con los datos obtenidos a partir de este ensayo, se recurre a la representación en una curva, de los tiempos de llegada versus la profundidad; el valor inverso de la pendiente de esta curva representa la velocidad de propagación de la onda sísmica.

El ensayo Down-Hole es usado con más frecuencia, debido a que genera ondas sísmicas de corte S con mayor facilidad que otros métodos (como el Up-Hole), así como su realización en áreas de ciudades muy pobladas, donde el espacio disponible es limitado.

Entre las aplicaciones más importantes de este método se encuentran: Detección de capas ciegas y la medición de la razón de amortiguamiento del suelo.

El uso de este método ha sido prevalente en Japón, debido a que puede ser combinado con perforaciones del ensayo SPT. En El Salvador se realizaron los primeros ensayos de este tipo en algunos municipios del AMSS (San Salvador, Ciudad Delgado, Apopa y Antiguo Cuscatlán) llevados a cabo por la empresa Consorcio Italiano, para la determinación de la velocidad de ondas sísmicas en los 15 metros superiores del estrato de Tierra Blanca, con el fin de confirmar el efecto amplificador de los movimientos sísmicos a los cuales se ve sometido dicho estrato. Dichos ensayos fueron realizados en el año 1988.

Algunas de las limitaciones que este ensayo presenta son: el grado de alteración del suelo cuando se realiza el sondeo, posibles efectos de fluidos en el sondeo, excesivo o insuficiente impulso, efectos de ruido sísmico y efectos del nivel freático. Así mismo, la expansión geométrica y el amortiguamiento pueden influir en las longitudes de onda y por tanto las velocidades de las ondas S pueden tener una interpretación incorrecta para



profundidades superiores a 30-60 m.<sup>10</sup> El mínimo espesor de un estrato que puede ser identificado mediante un ensayo Down-Hole es del orden de 2 a 3 m y la mayor parte de los datos obtenidos a partir de este ensayo, son gruesos promedios de las velocidades sobre varios estratos delgados.

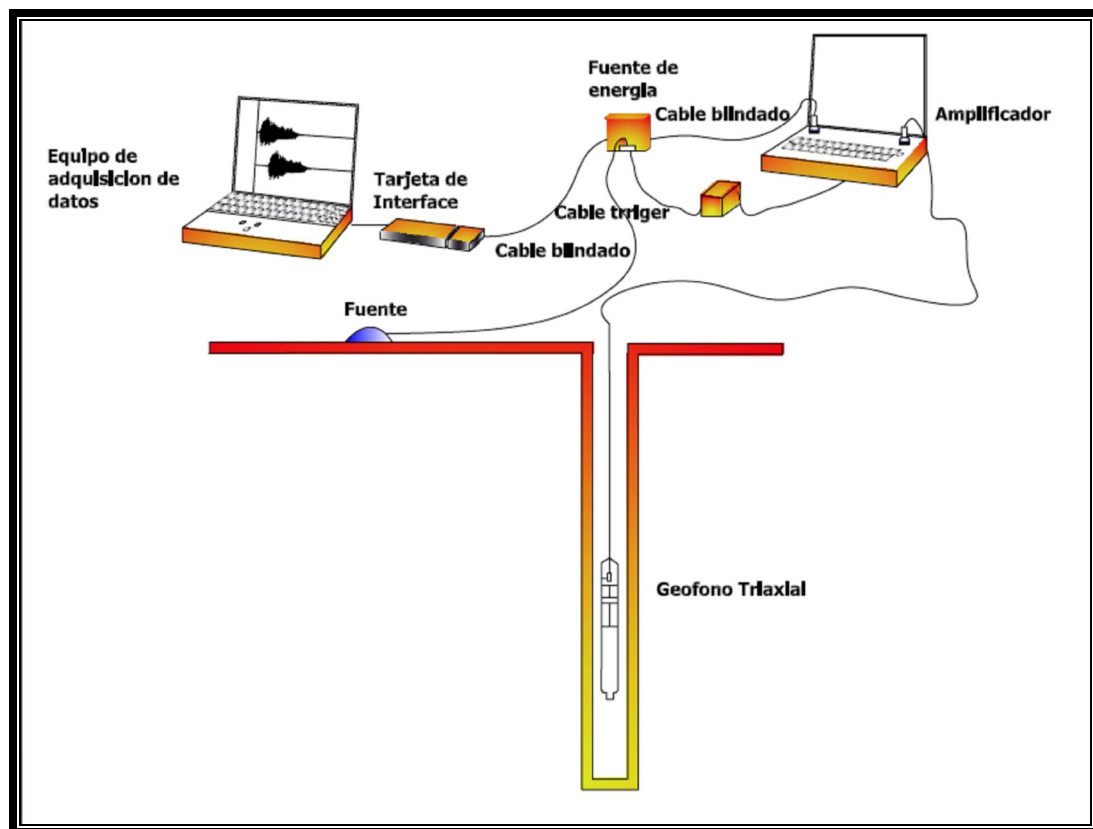


Figura 2.13 Ensayo down-hole, disposición detallada de la conexión de cables al geófono triaxial, trigger, equipo de adquisición y amplificador.<sup>4</sup>

#### 2.4.4.3 MÉTODO CROSS-HOLE.

En este método, una onda de corte o una onda compresional es generada en un sondaje fuente y su propagación en la dirección horizontal es detectada mediante receptores

colocados en dos o tres sondajes adyacentes en un arreglo lineal. La disposición del ensayo es mostrada en la figura 2.14.

La energía de impulso en el sondaje fuente es aplicada por medio de la caída de un martillo especial. Cuando el sondaje es realizado simultáneamente con el ensayo SPT, la caída del martillo puede ser utilizada para generar una onda compresional en el fondo del mismo. Para la generación de ondas de corte en el sondaje fuente, se usa un anclaje y un martillo especialmente diseñados, el cual es instalado a la profundidad deseada mediante un cable de tensión, y acuñado a la pared expandiendo los anclajes. Un movimiento cortante hacia abajo es generado dejando caer el martillo sobre la parte superior del anclaje adherido. Un dispositivo especial también puede ser adherido a este anclaje de tal manera que el golpe puede ser realizado hacia arriba desde el fondo. Así, la fuerza de impulso orientada verticalmente es aplicada a la pared del sondaje tanto hacia abajo como hacia arriba.

En los sondajes adyacentes, receptores de la velocidad vertical son colocados firmemente contra las paredes, a la misma elevación que el anclaje adherido en el sondaje fuente.

Una vez en el lugar, el martillo es soltado sobre el anclaje y las señales desde los receptores, son monitoreadas y almacenadas en un osciloscopio. La diferencia en el tiempo de viaje entre los dos receptores adyacentes se utiliza para calcular la velocidad de la onda de corte.

Los criterios para seleccionar las mejores distancias entre los sondajes son que el espaciamiento sea suficientemente lejano para proveer una diferencia apreciable entre el

tiempo de viaje, y que sea suficientemente cercano para reducir la posibilidad de captar ondas refractadas desde estratos adyacentes.

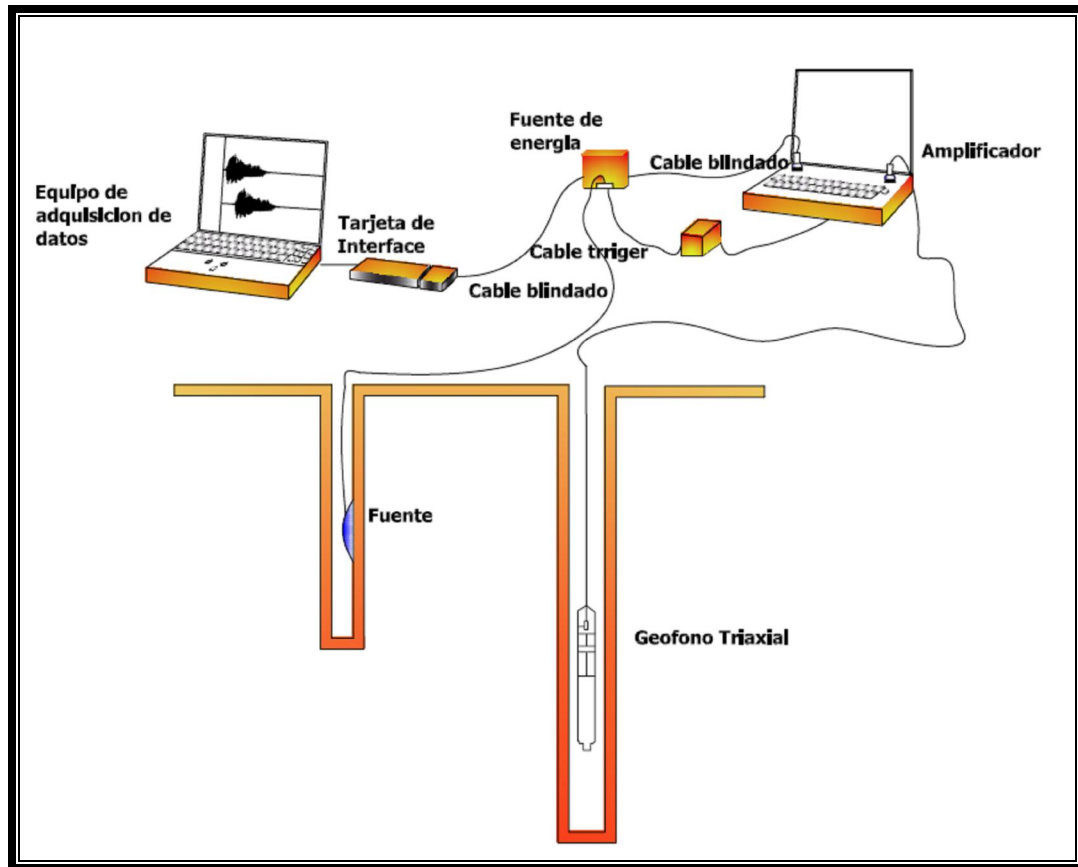


Figura 2.14 Esquema del ensayo cross-hole, en donde se muestran las partes del equipo.<sup>4</sup>

Entre las ventajas que este método ofrece, se encuentran: obtención de perfiles de velocidades a profundidades en el rango de 30 a 60 m. (utilizando fuentes emisoras mecánicas) y a profundidades mayores de 60 m (utilizando fuentes emisoras de tipo explosivo), así como la detección de capas ciegas (con mayor facilidad que otros métodos sísmicos).

En las primeras etapas de su desarrollo, se propuso que el método Cross-Hole era capaz de obtener el valor del módulo de elasticidad como una función de la deformación por corte, pero este aspecto no es utilizado totalmente en la práctica.

Algunas de las limitaciones que este ensayo presenta son: las velocidades de las ondas sísmicas son sensibles a la distancia emisor-receptor (especialmente en sondeos de 15 a 20 m de profundidad), las velocidades de las ondas pueden enmascarse si se atraviesan capas de alta velocidad (en estos casos se requieren otros métodos como la refracción sísmica), corrección de trayectorias de la curvatura del rayo sísmico en materiales que varían continuamente de velocidad y por último, el alto costo en el desarrollo del ensayo (debido a que se requiere más de tres sondajes).

#### **2.4.5 METODOS DE ONDAS SUPERFICIALES.**

Se conoce que las ondas de corte poseen velocidades de viaje similares a las ondas superficiales. Además, la información que proporciona la velocidad de las ondas de corte de un estrato de suelo es un parámetro muy importante para áreas de estudio de la ingeniería, tales como la dinámica de suelos y sismología (estudio de terremotos). Por lo que la información obtenida a través de la medición las ondas de superficie, por medio de los Métodos de Medición de Ondas Superficiales MASW y SAWS, puede ser usado para determinar la velocidad de las ondas de corte. Generalmente se miden ondas Rayleigh, por la facilidad para ser generadas por fuentes pasivas (ruido ambiente originado por tráfico, fabricas, viento, olas del mar, etc.) y activas (fuentes vibratorias, martillos y explosivos).

Las ondas Rayleigh y las ondas Love componen los dos tipos de ondas superficiales, y que se caracterizan por poseer velocidades relativamente bajas (en comparación con las ondas de cuerpo), frecuencias bajas y amplitudes altas. La velocidad de ondas superficiales depende de las propiedades de los materiales presentes en una dimensión equivalente al valor de la longitud de onda. La variación en la rigidez de las capas causa que las ondas viajen a diferentes frecuencias con diferentes velocidades, lo que provoca el fenómeno conocido como dispersión. La dispersión natural de las ondas superficiales puede ser usada para determinar la velocidad de ondas de corte.

Para frecuencias muy bajas (lo cual se relaciona con longitudes de onda muy grandes), las ondas viajan rápidamente. Para frecuencias muy altas (lo cual se relaciona con longitudes de onda muy grandes), las ondas viajan lentamente.

#### **2.4.5.1 METODO DE MEDICION DE ONDAS SUPERFICIALES MASW.**

Este método utiliza la dispersión de las ondas Rayleigh, que solamente toma dos tercios del total de la energía sísmica generada por el impacto de una fuente sobre la superficie, lo que indica una facilidad relativa de la medición en campo y de la adquisición de datos, por lo que se le considera muy útil.

Sin embargo, los inconvenientes pueden aparecer al igual que en todos los otros métodos sísmicos. Por ejemplo, la fuente genera ondas de cuerpo, tipos elevados de ondas Rayleigh, sonidos ambientales aleatorios y arribos de ondas coherentes de objetos superficiales, los cuales interfieren con la señal, ya que el modelo básico de las ondas Rayleigh es propagarse directamente desde la fuente.

El Método Sísmico de Multi-Canales (MASW por sus siglas en Inglés) usa diferentes cantidades de receptores extendidos en modelos lineales, espaciados a distancias iguales y conectadas a un canal individual de registro. La realización de una medición en campo consiste en la obtención de múltiples registros de ondas a diferentes distancias de la ubicación de la fuente que las genera.

Existen dos principales ventajas que presenta este método, las cuales son: la capacidad de reconocimiento del modelo y la redundancia en las mediciones.

La primera de ellas permite un alto control de calidad durante las fases de adquisición y procesamiento de datos. Por ejemplo, las ondas superficiales y de cuerpo pueden ser identificadas por separado, debido a su único tiempo de llegada y los modelos de amplitud obtenidos, son el resultado de la diferencia de velocidades de las ondas. Esto significa que parámetros críticos, como el registro y compensación de tiempo, pueden ser optimizados de manera favorable a través del análisis del ruido en campo.

La segunda ventaja del método permite aplicar varios tipos de técnicas para eliminar los ruidos y de esta forma, incrementar la proporción de ruido a la señal.

La forma básica de campo para la configuración y adquisición de datos del método MASW es similar a la que se usa en la medición de reflexión de un punto común de profundidad. Por esta similitud, el método MASW puede ser aplicado a una reflexión o refracción, si son utilizados receptores de baja frecuencia, figura 2.15.

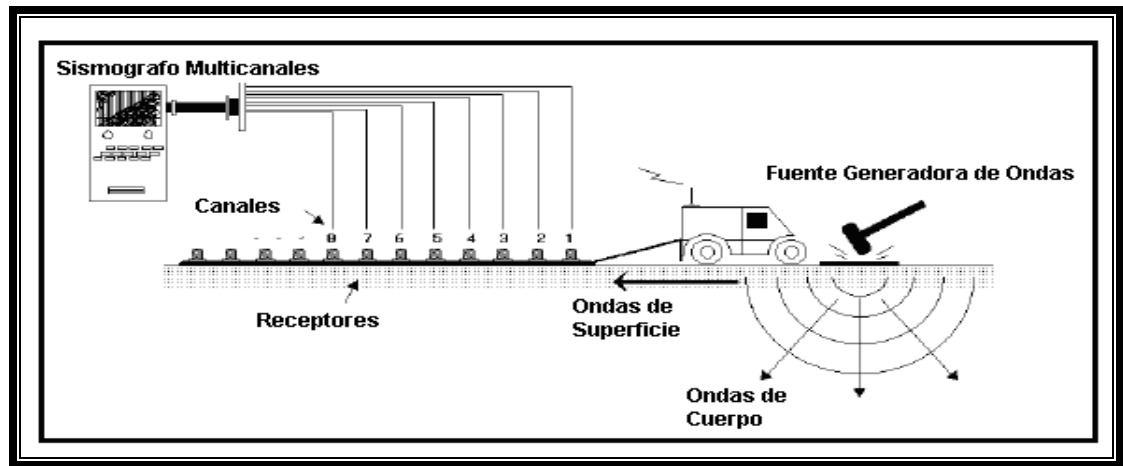


Figura 2.15 Esquema de Ensayo MASW <sup>17</sup>

#### 2.4.5.2 METODO DE ANALISIS DE ESPECTROS DE ONDAS SUPERFICIALES (SASW)

El método SASW es desarrollado aplicando un impulso vertical a la superficie del terreno y registrando las señales transitorias compuestas principalmente de ondas Raleigh. Las ondas Raleigh son registradas por medio de dos receptores (colocados en línea recta), comenzando a partir del punto de impulso. La distancia entre la fuente y el primer receptor es usualmente igual a la que hay entre los dos receptores. Esta configuración no es una norma, pero representa el resultado del balance de la influencia de diferentes factores, probados a través de varios análisis paramétricos basados en simulaciones numéricas. Espacios cortos (en el intervalo de 0.5-5.0 m) y fuentes de impulso débiles (tal como un martillo pequeño) son usados para frecuencias altas (que genera longitudes de ondas cortas), mientras que distancias largas (mayores a 60 m) y

<sup>17</sup> Choon B. Park, Richard D. Miller, Jianghai Xia, and Julian Ivanov. : “Seismic Characterization of Geotechnical Sites By Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) Method”, Kansas Geological Survey, The University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA.

fuentes que generan impulsos fuertes (tal como la caída de un cubo de concreto o el movimiento de una máquina bulldozer) son apropiados para rangos de frecuencias bajas (mayor penetración que permite obtener información de capas mas profundas). Esta opción esta relacionada a la atenuación de señales debido a la geometría y a la atenuación propia del material: señales que han de ser detectadas a grandes distancias puede ser generadas por fuentes que generan fuertes impulsos, que es capaz de generar una perturbación energéticamente muy rica.

En ocasiones la elección del espaciamiento entre receptores es tal que hay superposición de información entre registros sucesivos.

La elección de distancias intermedias entre receptores es establecida por el rango de frecuencia de los puntos en la curva de dispersión, los cuales son obtenidos de cada configuración de receptores.

Los receptores son colocados de acuerdo a uno de los modelos geométricos mostrados en la figura 2.16.

Muchas repeticiones del método son llevadas a cabo en campo, según sea la configuración geométrica de los receptores y la fuente; los registros de las señales son promediados para optimizar la proporción del ruido en la señal. El cambio de posición de los receptores y el uso de diferentes fuentes, permite que la curva de dispersión pueda ser construida incluso con un rango de frecuencia débil, lo que es suficiente para realizar la caracterización de las ondas.

Las señales registradas por un analizador de señales sísmicas es capaz de calcular el tiempo y la frecuencia dominante. La curva de dispersión calculada para cada disparo es



fusionada dentro de una curva de dispersión compuesta. Se pueden construir modelos iterativos para encontrar un perfil de velocidades de ondas de corte a partir de la dispersión teórica lo mas cercana a los datos observados.

Este método puede ser aplicado en lugares donde se tiene presencia de un alto nivel de ruido ambiente, donde para otros métodos sísmicos, como el de refracción y el de reflexión, esto constituye un inconveniente que no permite la obtención de registros muy claros de ondas.

Este método permite medir la dispersión natural de las ondas de superficie, con lo cual se puede determinar la velocidad de las ondas de corte, la cual es un parámetro para la evaluación de las propiedades dinámicas del suelo. Por medio de la velocidad de ondas de corte se puede estimar el esfuerzo cortante del suelo, lo cual es información de gran valor particularmente en regiones con riesgos de terremotos, en la etapa de diseño de edificios.

Además, con este método se puede determinar el perfil de rigidez y el perfil de la relación de amortiguamiento de los suelos.<sup>13</sup>

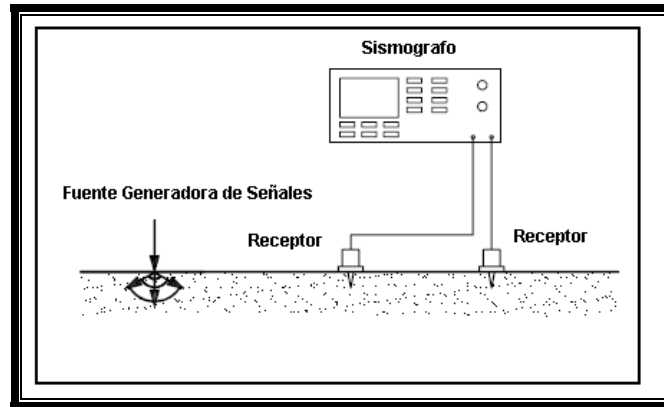


Figura 2.16a

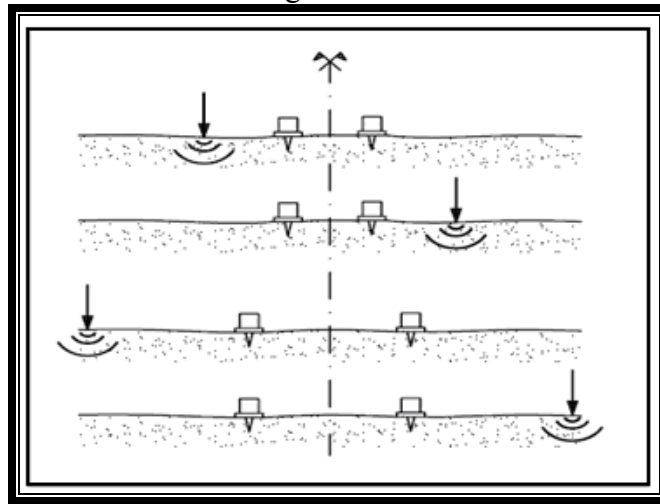


Figura 2.16b

Figura 2.16 a) Método SASW b) Arreglo común de receptores con diferente posición de la fuente.

## **2.5 ORIGEN GEOLOGICO Y COMPOSICION DE LOS SUELOS DEL MUNICIPIO DE SAN SALVADOR.**

### **2.5.1 DEFINICION DE “TIERRA BLANCA”.**

Es un término definido por el Mapa Geológico Oficial de la República de El Salvador, que describe a una ceniza volcánica riolítica-dacítica de origen piroclástico, de color gris-claro a blanco, que constituye el suelo con mayor predominancia en el AMSS. Este suelo es proveniente de la formación geológica más reciente conocida como Formación San Salvador.

Las cenizas volcánicas son productos piroclásticos con características fricciones, en los que predomina “la Pómez”, la cual es un silicato de aluminio y hierro generalmente ácido, con reducida densidad, tal como espuma solidificada. En ocasiones tiene efectos puzolánicos; así también presenta diferentes colores según su composición química (blanco, gris acero, gris verdoso, rosado y gris intenso). Sus granos presentan una forma equi-dimensional y su textura es rugosa.

La distribución granulométrica de la Tierra Blanca varía, pero básicamente puede clasificarse, a nivel geotécnico, como un Limo Arenoso (ML) o una Arena Limosa (SM), normalmente consolidada, de grano fino, no plástica y de mediana permeabilidad, la cual es fácilmente erosionable. Los porcentajes de arena de pómez varían del 10% al 80%, y en ocasiones se presenta como arena limpia (SP). Así mismo, puede encontrarse junto con cascajos volcánicos intemperizados en forma de arena

arcillosa (SC), de mediana plasticidad, formando estratos de pequeños espesores subyaciendo a las cenizas volcánicas.

Debido a su origen geológico, las cenizas volcánicas poseen un grado de cementación muy variable, situación que define su comportamiento granular y que puede comprobarse al observar, en varios puntos del AMSS, taludes verticales de considerable altura completamente estables. La cementación es producida por un amarre que existe entre las partículas y la tensión capilar. Este amarre o trabazón mecánica de los granos se produce debido a la angulosidad de las partículas de pómez presentes en las cenizas volcánicas. La tensión capilar es la responsable de producir esfuerzos efectivos en el suelo.

Estudios y observaciones acerca del comportamiento de la Tierra Blanca (Guzmán y Melara 1996), han determinado que éste varía en función del grado de saturación de la masa de suelo. Por otra parte, observaciones hechas sobre la estabilidad en taludes del AMSS, afirman que éstos tienden a perder rápidamente su resistencia cuando se saturan, ya que se rompe la cohesión aparente que presenta el suelo en su estado natural.

### **2.5.2 ORIGEN DE LA TIERRA BLANCA DE SAN SALVADOR.**

La Tierra Blanca tiene su origen en el centro volcánico que se encuentra actualmente sumergido en el Lago de Ilopango y es resultado de la violenta explosión del Volcán de Ilopango, la cual generó una nube de ceniza ardiente que se elevó a los cielos y, al descender, tomó rumbo hacia el oeste, en dirección del Volcán Quezaltepeq (Volcán

de San Salvador), recorriendo una distancia superior a 43 kilómetros. Posterior a la explosión, un extenso sector de la zona central del país quedó cubierto por un manto estéril tierra blanca, conocido como miembro s4, de la Formación San Salvador.

### **2.5.3 MAPA DE ESPESORES.**

La ceniza acumulada cubrió una vieja topografía y consecuentemente, las partes bajas se nivelaron y los cursos de los ríos fueron afectados. Surgió un nuevo nivel, entre 30 y 50 metros más elevados del existente antes de la erupción, y mucho del material volcánico fue transportado en las primeras lluvias.

Los espesores de estos estratos varían de 1 a 2 m en las faldas del Volcán de San Salvador, hasta 50 m en los alrededores del Lago de Ilopango, aunque se tiene el reporte de la excavación de un pozo de agua en el lado este del AMSS, el cual penetró 210 m a través de depósitos piroclásticos y epiclásticos sin encontrar ningún tipo de roca.

En la figura 2.17 se presenta la distribución de las depositaciones de Tierra Blanca.

### **2.5.4 COMPOSICIÓN DE LOS SUELOS DE SAN SALVADOR.**

Para el estudio de los diferentes materiales que componen los suelos del AMSS y sus orígenes, es necesario establecer sus límites geográficos, los cuales son los siguientes:

1. Al Norte, limita con los Cerros de Mariona (798 msnm).
2. Al Sur, se encuentra la Cordillera del Bálsamo (1000 msnm) y el Cerro San Jacinto (1154 msnm).

3. Al Oeste, colinda con el Volcán de San Salvador (1967 msnm).
4. Al Este, existe un escarpo cuya superficie alcanza los 438 msnm, que se inclina hacia el Lago de Ilopango.

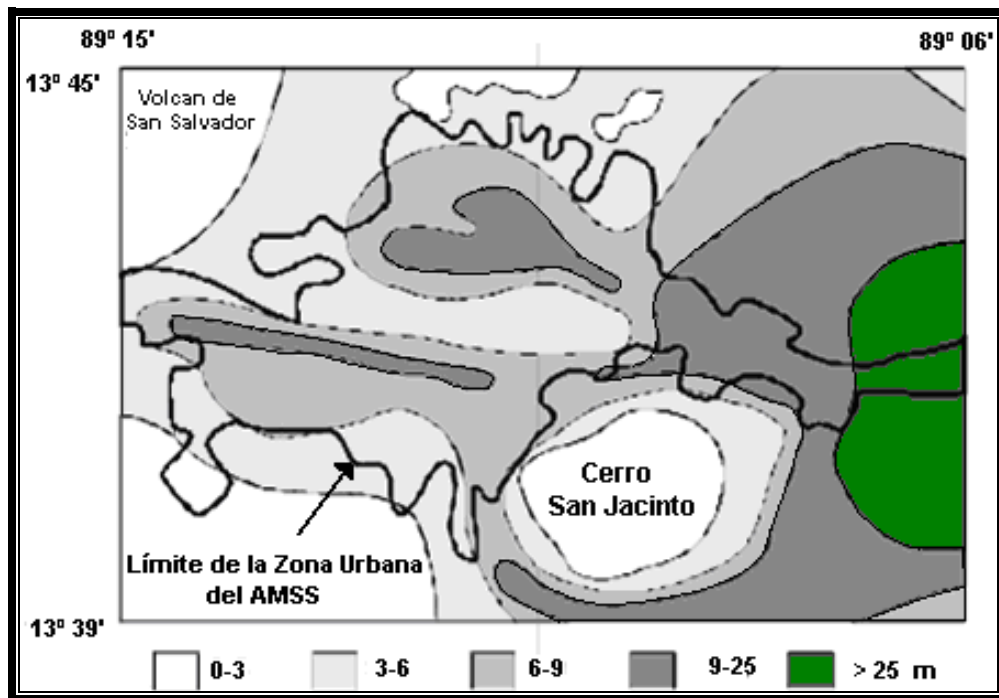


Figura 2.17 Mapa de espesores de Tierra Blanca en San Salvador.<sup>18</sup>

Los suelos del AMSS están constituidos por tres formaciones geológicas bien definidas: Formación Bálsamo, Formación Cuscatlán y Formación San Salvador, siendo esta última la más reciente y la de mayor predominancia en la zona.

Con relación a la estratigrafía del AMSS, se puede decir que en toda el AMSS hay una serie de rocas del Plioceno hasta el Holoceno.

<sup>18</sup> Bommer, Julian (Julio-Agosto 1996): “Terremotos, urbanización y riesgo sísmico en San Salvador”, Boletín N° 18, Prisma.

### **Formación Bálsamo (Plioceno)**

Compuestos por productos volcánicos en los cuales prevalecen los aglomerados con intercalaciones de tobas endurecidas y corrientes de lava basáltica-andesítica con un espesor aproximado de 500m, también hay suelos fósiles de color rojo de gran profundidad (hasta 20 m). Además, también se encuentran rocas extrusivas con pocas intercalaciones de tobas y aglomerados; la parte inferior es de carácter andesítico y la parte superior basáltica. Hay afloramientos más ácidos (hasta riolíticos) sobre todo en el E del país. El espesor aproximado de esta serie es mayor de 1000 m.

### **Formación Cuscatlán o Guazapa (Pleistoceno hasta Plioceno)**

Son productos extrusivos de los volcanes individuales de la cadena volcánica vieja que atraviesa la parte N del país. Estos productos son: corrientes de lava, aglomerados, tobas, escorias y cenizas volcánicas endurecidas y tobas fundidas con intercalaciones de sedimentos lacustres y fluviales. El espesor de los estratos y su sucesión varía de volcán a volcán. También se encuentran suelos fósiles de color rojo de poca profundidad (hasta 4 metros).

### **Estratos de San Salvador (Holoceno hasta Pleistoceno)**

Son productos extrusivos de los volcanes individuales de la cadena volcánica joven que atraviesa la parte S del país. Estos productos son: corrientes de lava, cúpulas de lava, tobas fundidas, tobas, pómez, escoria y cenizas volcánicas, que se encuentran a veces intercalados con sedimentos lacustres. El espesor de los estratos y la sucesión varía de volcán en volcán. También se encuentran suelos fósiles color café y negro.

De esta formación típicamente se distingue un suelo denominado localmente como “Tierra Blanca”.

**a. La Tierra Blanca o Tierra Blanca Joven (TBJ).**

Estos depósitos de TBJ afloran extensamente sobre todo en San Salvador y están constituidos, por lo menos, por 6 niveles correspondientes a diversas faces deposicionales (ver fig. 2.18 y Tabla 2.05). Desde la base al techo, se encuentra:

- i. Depósito basal de cineritas finas: se trata de un depósito de caída constituido por vidrio volcánico y por abundante material lítico, de tamaño arena. El espesor varía desde pocos centímetros hasta 30 cm.
- ii. Depósito de base, de lapilli de piedra pómez: también se trata de un depósito de caída, constituido por lapilli de piedra pómez y material lítico en una escasa matriz fina. El espesor del depósito varía desde 1 a 50 cm.
- iii. Depósito cinerítico con pisolitas, T2: se trata de un depósito de caída de ceniza blanca, rico en pisolitas (diámetro=1-2 cm). T2 posee un aspecto masivo; raramente con algún signo de estratificación. El material lítico aparece muy raramente y, en general, está concentrado en la base del depósito. En las partes media y superior, constituyen el núcleo de las pisolitas. Los espesores alcanzan los 6 m.
- iv. Depósito de "surge": es un depósito constituido predominantemente por ceniza y cristales, con buena selección, con espesores variables entre 30 y 2 cm, con estructura planar. La base de esta unidad consiste en un estrato de ceniza gruesa, sin selección, con estratos sobreyacentes de ceniza muy fina. Sobre estos niveles hay una serie de pequeños estratos, con una buena selección, de arena vítrea, rica en cristales,



intercalados entre otros estratos constituidos por cenizas finas y fragmentos de piedra pómez. Los niveles con ceniza gruesa presentan, algunas veces, una estructura del tipo "sandwave". En algunas secciones esta unidad, conjuntamente a la parte superior de la T2, fue doblada y, posteriormente, cortada por el flujo piroclástico superior (T1C).

- v. Depósito del flujo piroclástico T1C: se trata de un flujo piroclástico caracterizado por material pomiceo con dimensiones que alcanzan algunos decímetros, por bombas y por fragmentos líticos situados en una matriz fina. En el interior de tal flujo, en los depósitos más próximos (San Marcos, Aeropuerto de Ilopango), están presentes, al menos, tres niveles particularmente ricos en bloques con dimensiones de hasta 40 cm. El nivel más bajo, que aparece a 2 m aproximadamente de la estructura "surge", alcanza espesores hasta de 70 cm, y es el único que se encuentra en los depósitos más distantes, en este caso sin embargo, en contacto directo con la estructura "surge". El aspecto fumarolizado del material lítico sugiere que estos niveles se deban a efectos del tipo "cratering", ocurridos durante las diversas explosiones. En algunos afloramientos, el tipo T1C resulta estar formado por dos flujos separados por un estrato con granulometría fina. En el área de San Salvador los espesores de este depósito alcanzan los 15 m. Los espesores medidos demuestran que la zona de emisión de T1C, se halla en el área de Ilopango, probablemente en su lado noroccidental.
- vi. Depósito de caída T1r: se trata de un depósito cinerítico, de caída, bien estratificado, con buena selección, rico en pisolitas y en material lítico de pequeño tamaño. Tal depósito puede ser considerado como la fase de caída de la colada piroclástica T1C. En el área de San Salvador, esta unidad se asemeja mucho a la T2; la única diferencia

es la presencia, en Tlr, de ocasionales lentes con fragmentos de piedra pómez. Los espesores del depósito son mayores que 4 m.

### TIERRA BLANCA JOVEN



Figura 2.18 Fases Deposicionales de la Unidad Tierra Blanca Joven<sup>8</sup>

UNIDAD (ESPESOR MAXIMO, METROS)	CARACTERISTICAS DEL DEPOSITO	INTERPRETACION
Depósito de caída (>4m)	Grano fino, raros niveles de pómez, líticos y pisolitas	CO-IGNIMBRITA (depósito de caída)
Depósito de flujo piroclástico (15m)	Matriz fina. Pómez y líticos también grandes	IGNIMBRITA (Flujo piroclástico)
Unidad de surge (0.55m)	Linares, ricos de cristales	BASE SURGE
Depósito de caída cinerítico (6m)	Grano fino. Muchas pisolitas	ERUPCION FREATOPLINIANA
Depósito basal de lapilli pomíceos (0.50m)	Grano grueso. Lapilli pomíceos; hay poca matriz fina	EXPLOSION INICIAL
Depósito basal cinerítico (0.37m)	Grano fino; presencia abundante de líticos	

Tabla 2.05 Fases Deposicionales de la Unidad Tierra Blanca Joven. Joven<sup>8</sup>

Por otra parte, en 1999, se definieron cuatro depósitos de Tierra Blanca, provenientes de la Formación San Salvador, que del más reciente al más antiguo, son: Tierra Blanca Joven (TBJ), TB2, TB3 y TB4 (ver figura 2.22). Estos depósitos están relacionados al menos con grandes erupciones y pueden encontrarse tan alejados como 20 Km hacia el norte, sur y este del Lago de Ilopango, y hasta 80 Km hacia el oeste. De estos depósitos, el más reciente (TBJ) ha sido también el más estudiado, teniéndose documentos como el presentado por Hart y McIntyre en 1978, denominado “Tierra Blanca Joven Tephra from the AD 260 Eruption of Caldera de Ilopango” (La Tierra Blanca Joven Tephra, proveniente de la erupción de la Caldera de Ilopango, 260 DC), que explican con detalle el origen y las unidades componentes de este depósito.

La unidad TB4 representada en la figura 2.19, está conformada por una capa de ceniza fina producto de las explosiones iniciales de la Caldera de Ilopango, y que fue depositada encima del suelo existente. Esta unidad se compone de líticos de grano fino, así como de partículas gruesas de vidrio y ceniza fina. El espesor varia entre 0.01 m y 0.50 m, y es posible encontrarla dentro de un radio de 50 Km con respecto al Lago de Ilopango.

Los materiales de la unidad TB3 son una combinación de siete sub-unidades, compuestas de partículas finas de vidrio, generadas por la erupción violenta de la Caldera de Ilopango. Estas sub-unidades son reconocidas por la diferencia en los tamaños de los granos y por la cantidad de fragmentos líticos. Es posible encontrar estratos con espesores pequeños de este material a distancias de 75 Km al nor-oeste del lago.

La unidad TB2 está conformada por cenizas vítreas ricas en cristales laminados de diversos tamaños, los cuales surgen del enfriamiento del material piroclástico que asciende a la atmósfera, producto de la erupción de la Caldera de Ilopango. Estas cenizas se depositaron sobre las demás unidades en espesores menores a 55 cm.

La unidad TBJ, se compone de dos sub-unidades. La primera, es una componente de flujo piroclástico caracterizado por material pumítico de gran tamaño y fragmentos líticos contenidos dentro de una matriz de grano fino. El espesor de esta unidad es considerado de 15 m dentro del AMSS. La segunda, corresponde al estrato de Tierra Blanca Joven más superficial, el cual posee un color similar que la primera unidad (flujo piroclástico) y se supone que su formación ocurrió al mismo tiempo. La misma representa a la fase de caída piroclástica y se compone de ceniza de varios tamaños y ocasionalmente partículas de grano grueso o pequeños líticos. En el AMSS las dos sub-unidades se distinguen entre sí, pues la segunda no posee lentes de fragmentos de pómez.

Finalmente, la Tierra Blanca Joven (TBJ) se define como el manto espeso de ceniza, que toma el nombre genérico de Tephra (del griego “ceniza”) por constituirse de un material piroclástico como escoria pumítica, ceniza y lapilli, el cual se caracteriza por una coloración clara y por ser la más reciente de las depositaciones de las erupciones de la Caldera de Ilopango (ver figura 2.20).

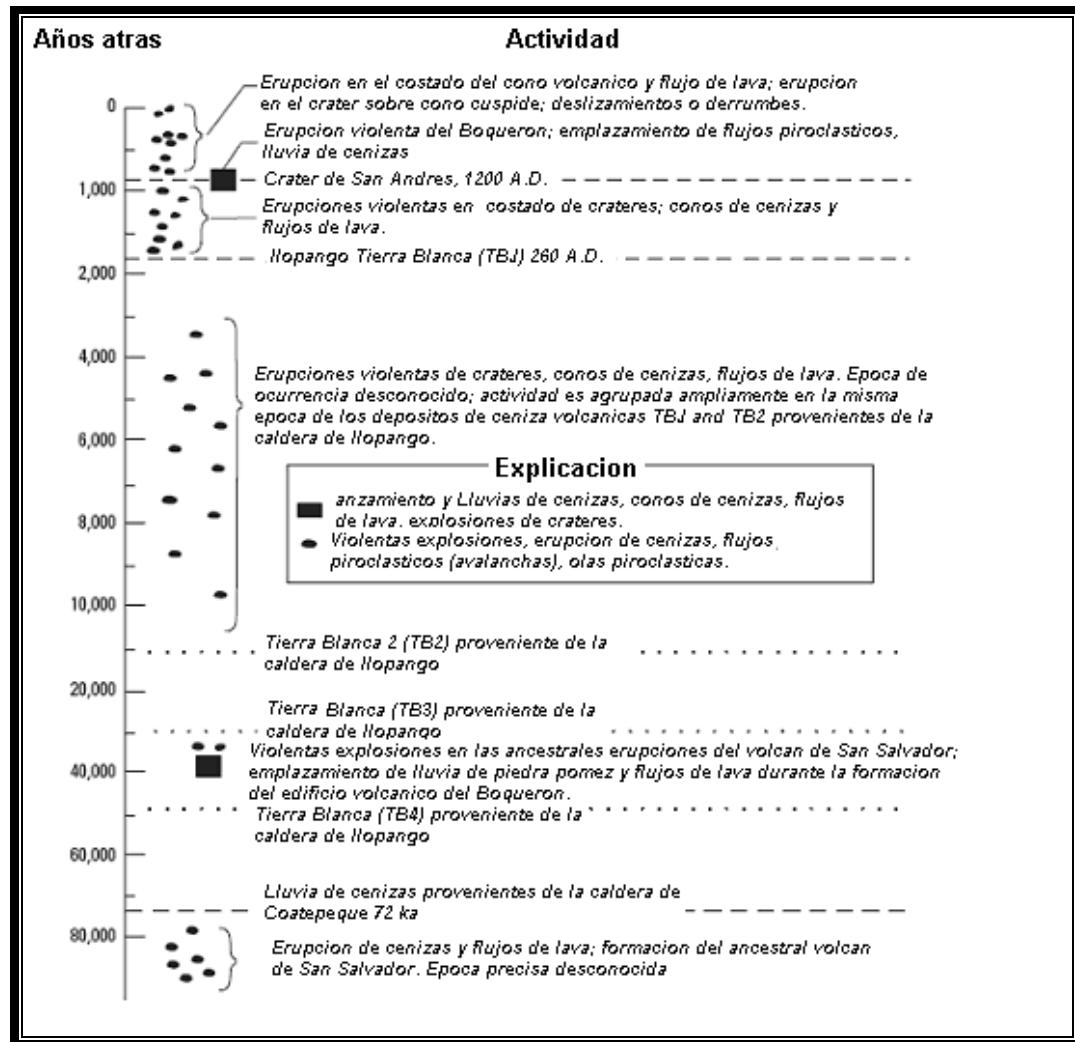


Figura 2.19 Resumen de la Historia de Erupciones del volcán San Salvador, basado ampliamente en Sofield (1988). La escala de tiempo es aproximadamente igual a años calendario. Los depósitos regionales de las caídas que tienen fechas conocidas se muestran con líneas cortadas, los depósitos de caídas regionales con fechas aproximadas se muestran con líneas punteadas.<sup>19</sup>

<sup>19</sup>U.S. Geological Survey, (1988): "Riesgos volcánicos en la Región de San Salvador", San Salvador, El Salvador



Figura 2.20 Perfil de los depósitos de suelos presentes en San Salvador. La foto muestra el talud en la conexión del boulevard orden de Malta con la Autopista a Comalapa, a la altura del Rancho Navarra.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> Ing. Manuel López, (2005): “Apuntes de clase “Fundamentos de Dinámica de Estructuras e Ingeniería Sísmica””.

# CAPITULO III

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La prospección geofísica es definida como una metodología para la deducción de las condiciones del subsuelo, a través de la observación de fenómenos físicos relacionados con la estructura geológica de un lugar en particular. Originalmente, fue desarrollada para la ubicación de yacimientos de petróleo y otros depósitos minerales. El método de refracción fue el primer método de prospección geofísica aplicado para la búsqueda de petróleo. Debido a los actuales avances tecnológicos, este método está utilizando equipos más sofisticados que, haciendo uso de computadoras, permiten obtener resultados más precisos, además de mejorar la portabilidad de los instrumentos utilizados en el desarrollo del método. Pero a pesar de ello, el funcionamiento básico del equipo, las prácticas elementales de campo y los métodos de interpretación generalizados no han cambiado desde los últimos 40 años, aunque nuevas técnicas de interpretación han sido propuestas recientemente.

Los procedimientos de campo para la obtención de datos y los métodos de interpretación recomendados para el método de refracción están bien establecidos y son razonablemente directos y de fácil entendimiento permitiendo a cualquier usuario la formación de criterios sólidos basados en los fundamentos de la teoría de ondas y del método de refracción para utilizar los resultados de esta alternativa de una forma razonable y coherente a lo reflejado en los resultados de otros ensayos de exploración subsuperficial (ver tabla 2.1, Cap. II).

Cuando los resultados del método de refracción se complementan con el conocimiento de la geología del sitio en estudio y la experiencia, permite la obtención de información



más detallada de las condiciones del subsuelo. Este método se ha utilizado con frecuencia en la definición de estructuras geológicas complejas.

En este capítulo, se presenta la teoría básica y la metodología para el desarrollo del ensayo de refracción sísmica de ondas P que incluye el procedimiento de campo para realización de una inspección (según lo indica la Norma ASTM D-5777“Standar Guide for Using the Seismic Refraction method for Subsurface Investigation”), tipo y características del equipo utilizado en el ensayo, y las causas comunes de error en la realización del ensayo de refracción sísmica.

### **3.2 GENERALIDADES SOBRE EL METODO DE REFRACCION SÍSMICA.**

El método de la refracción sísmica consiste en la medición del tiempo de viaje de la primera onda detectada (onda de compresión u onda P) en una serie de puntos separados a intervalos regulares a lo largo de una línea de referencia ubicada sobre la superficie de la tierra. Dicha línea se conoce como línea de inspección, y en cada punto de la misma se encuentra un dispositivo receptor de señales llamado geófono (ver figuras 3.01). Las ondas detectadas en cada receptor son originadas a partir de una fuente de energía de tipo impulsiva en una ubicación estratégica conocida con el nombre de punto de disparo, pudiendo utilizar una explosión o el impacto de un objeto sobre el terreno (ver figura 3.02).

Luego, el conjunto de registros obtenidos de la realización del ensayo son recolectados, visualizados, revisados y almacenados por un equipo de adquisición de datos, que incluye instrumentos como sismógrafo, batería y, en ciertas ocasiones, una computadora

portátil (ver figura 3.03), para formar parte de un expediente o archivo digital sobre el cual se realiza el respectivo procesamiento.



Figura 3.01. Fotografía de Receptores o Geófonos.<sup>21</sup>

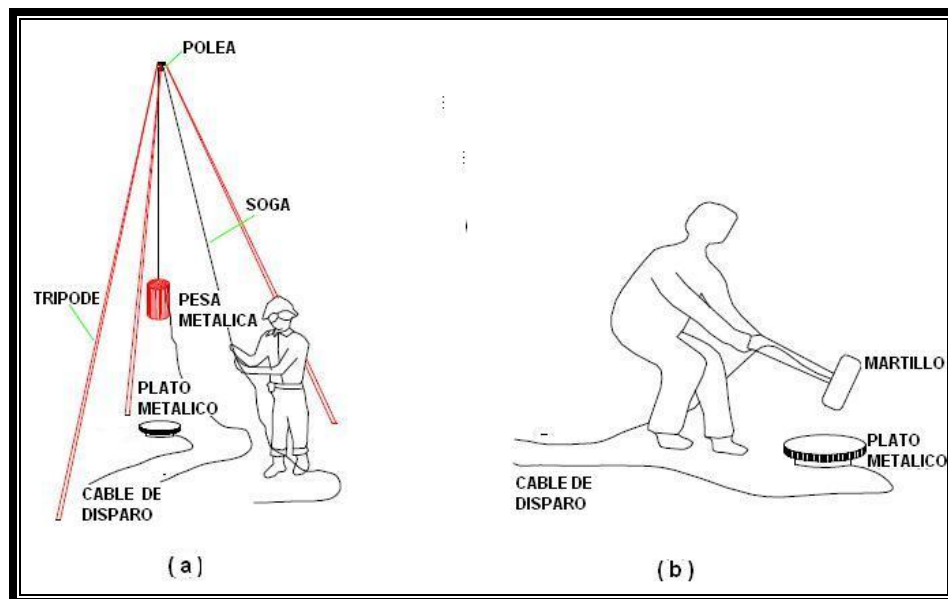


Figura 3.02. Generación de la onda por impacto sobre el terreno utilizando: a) un martillo montado en un trípode; y b) un martillo con mango (almádana)<sup>4</sup>

<sup>21</sup> GEOMETRICS (2001): Operator's Manual "GEODE and StrataVisor NZ/NZC"



Figura 3.03. Equipo de adquisición de datos.<sup>21</sup>

El instante en que se originan las ondas (llamado tiempo cero) es registrado dentro del expediente de pulsos de llegada. Cada expediente consta de un conjunto de registros individuales provenientes de cada geófono. A un registro individual se le denomina traza, y al conjunto de trazas se le denomina sismograma. Los datos contenidos dentro de un expediente están en unidades de tiempo y distancias de recorrido (ver fig. 3.04).

La primera llegada o primer arribo consiste en el tiempo que tarda la onda en viajar desde la fuente a cada receptor.

Durante el procesamiento de los datos contenidos en un expediente, estos son manipulados para ser presentados en un formato gráfico llamado curva tiempo-distancia o domocrónica (ver figura 3.05) cuya forma esta relacionada con las condiciones geológicas del lugar en estudio. Este gráfico es el punto de partida para determinar la variación de la velocidad de las ondas con respecto a la profundidad alcanzada durante el desarrollo de un ensayo de refracción. Las velocidades calculadas están relacionadas a

la identificación y cuantificación de diferentes tipos de material detectados en profundidad.

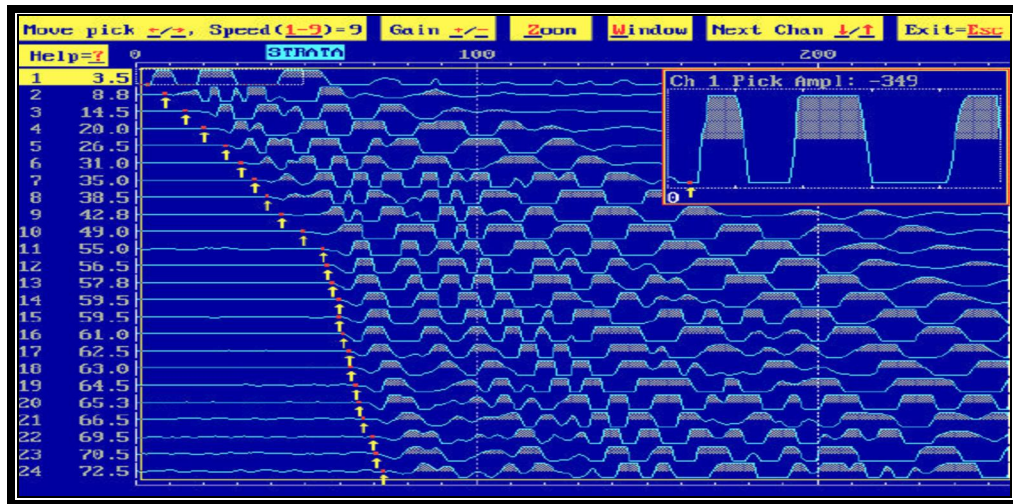


Figura 3.04. Expediente de un registro típico (sismograma) obtenido de un ensayo de refracción sísmica, observado en un sismógrafo.<sup>4</sup>

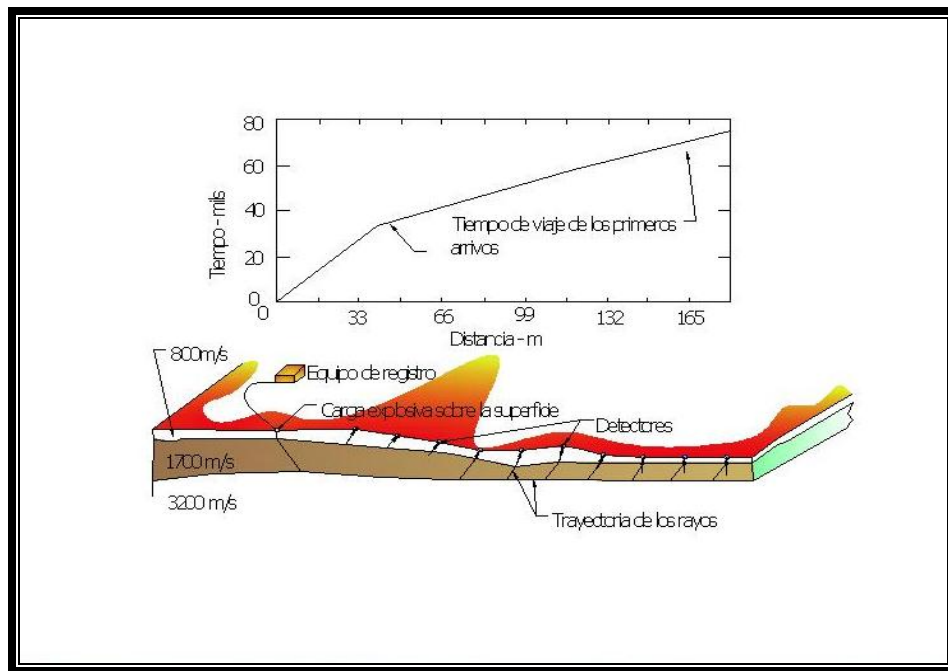


Figura 3.05 Diagrama esquemático del método de refracción sísmico.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Redpath, Bruce, (1973): "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations, Explosive Excavation Research Laboratory Livmore, California U.S.A.

La información obtenida a partir del método de refracción tiene diferentes usos, según el nivel de detalle requerido de la prospección, entre los que destacan la identificación de materiales en profundidad, determinación de espesores de estratos, detección del nivel freático, determinación de la facilidad de excavabilidad de los materiales en la subsuperficie, ejecución de estudios de estabilidad y riesgos geológicos (detección de fallas y cavidades subterráneas), determinación de parámetros dinámicos in situ (cuando es difícil la tarea de extracción de muestras inalteradas), determinación de la facilidad de excavabilidad de los material subsuperficiales, clasificación geomecánica del subsuelo, etc.

En sitios en los que se pretende desarrollar obras civiles de gran importancia, es necesaria la recopilación de una cantidad suficiente de información sobre las condiciones del subsuelo, que sirva como herramienta al ingeniero estructural, al ingeniero geotécnico, al geólogo y al hidrogeólogo para la determinación de parámetros tales como: la estratigrafía del sitio, compacidad del subsuelo de fundación, definición y dimensionamiento del tipo de cimentación a utilizar, cota de fundación en la que se encuentra el suelo sano y firme, ubicación de yacimientos de rocas sanas y/o alteradas, etc., que derivará en costos en las etapas de movimiento de tierras (terracería) y edificación de obras civiles.

### **3.3 DESCRIPCION DEL EQUIPO DE MEDICION UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE REFRACCION SISMICA.**

El equipo utilizado para el ensayo de refracción sísmica está compuesto por diferentes elementos entre los cuales se encuentran: sismógrafos, geófonos, cable de conexión para los geófonos, fuente de energía, amplificadores y un cable disparador. A pesar que existe una amplia variedad de equipos para el ensayo de refracción sísmica, su elección está basada en el objetivo de la investigación, tipo de ondas sísmicas que serán registradas (Ondas P o S), alcances del ensayo y el nivel de detalle que se requiera.

Hay características propias de las ondas sísmicas que deben ser consideradas para la elección del equipo, siendo la mas relevantes el periodo característico de vibración y la frecuencia. Respecto al periodo, las ondas de cuerpo tienen un periodo en el intervalo de 0.01-50 segundos; ondas superficiales un intervalo de 10-350 segundos; y oscilaciones libres un intervalo de 350-3600 segundos.

Respecto a la frecuencia, se conoce que el terreno actúa como un filtro y el espectro de frecuencias disminuye al alejarse del punto de disparo. Las ondas de frecuencia elevada se amortiguan más rápidamente que las demás a consecuencia de los rozamientos, y por otro lado, las de baja frecuencia pierden rápidamente su energía en las capas delgadas y compactas. Generalmente, las bandas de frecuencia más importantes son las de 3-100 hertz para las ondas refractadas, de 10-150 hertz para las reflejadas a gran profundidad y de 30-500 hertz para las reflejadas a poca profundidad.

### 3.3.1 GEÓFONOS.

Se llaman geófonos a los sensores o receptores que transforman los movimientos sísmico del suelo a señales eléctricas de características de frecuencia y amplitud análoga a la de las ondas sísmicas que son detectadas y registradas por el sismógrafo. Los geófonos, en su mayoría, están conformados por un sistema amortiguador base donde se intercalan un conjunto de espiras y un imán, un sistema mecánico de suspensión y adicionalmente una resistencia para el control de la señal que cumple también la función de amortiguamiento.

Al producirse un movimiento relativo, este sistema emite la señal de voltaje (pulsos eléctricos). Debe tenerse en cuenta que los sensores tienen una frecuencia natural, y que para valores menores a esa frecuencia, la amplitud del movimiento disminuye linealmente hasta cero. Cada geófono tiene un cable para conexión de un metro de longitud aproximadamente, además de terminales tipo clip para enlazarse con otro cable que conecta a los geófonos con el sismógrafo.

En su selección hay que considerar<sup>23</sup>:

- Parámetro medido: desplazamiento, velocidad o aceleración.
- Dirección de la medición: Verticales (eje “y”), horizontales (eje “x”), biaxiales (ejes “x” y “y”), triaxiales (ejes “x”, “y” y “z”).
- Rango de frecuencias. “Filtro de frecuencias”.
- “Deformación de las ondas” (respuesta del geófono) en la captación.
- Sensibilidad. Calibración.

---

<sup>23</sup> Boletín técnico (2003): “Caracterización de suelos con métodos geofísicos”, Guaira, Macuto Venezuela

Para trabajos de refracción sísmica en los que interesa medir el tiempo de viaje de ondas P, se emplean *geófonos* verticales cuya frecuencia varía de 1 a 14 Hz.

### 3.3.1.1 TIPOS DE GEÓFONOS Y SUS CARACTERÍSTICAS

Existen diferentes tipos de geófonos, en cuanto a su diseño y características de respuesta, éstos se construyen con normas muy estrictas en cuanto a las características de la señal de salida, para que sean compatibles con todos los sismógrafos. Los geófonos se agrupan de acuerdo al sistema de generación o tipo de salida de la señal eléctrica, según se detalla en la Tabla 3.01

SISTEMA DE GENERACION DE LA SEÑAL ELECTRICA	TIPO DE SALIDA DE LA SEÑAL ELECTRICA
Electromagnético	Salida simple
Reluctancia variable	Preamplificada
Piezoeléctrico	Señal regulada
Capacitivo	

Tabla 3.01. Tipos de geófonos.<sup>4</sup>

Según la dirección de medición de las ondas, los tipos de geófonos se dividen en:

- Geófonos uniaxiales: utilizados para la medición de la componente de movimiento vertical (V). Este tipo de geófonos son utilizados para la medición de ondas P y forma parte del equipo utilizado en aplicación de los métodos de refracción sísmica y reflexión sísmica (ver figura 3.06).



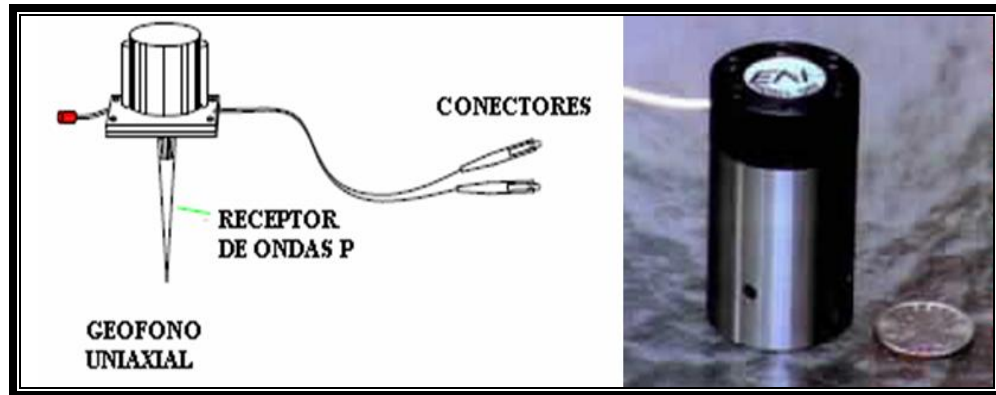


Figura.3.06 Esquema de geófono uniaxial (izquierda) y modelo de geófono vertical LNA 102 de alta resistencia a climas extremos (derecha).<sup>4</sup>

- Geófonos biaxiales: utilizados para la medición de las componentes de movimiento vertical (V) y de una componente en el plano horizontal en la dirección perpendicular (H1) al eje de la línea de inspección. Este tipo de geófonos son utilizados para la medición de ondas P y ondas S, y forma parte del equipo utilizado en aplicación del método de medición de ondas superficiales MASW y del método de análisis de espectros de ondas superficiales SASW (ver figura 3.07).

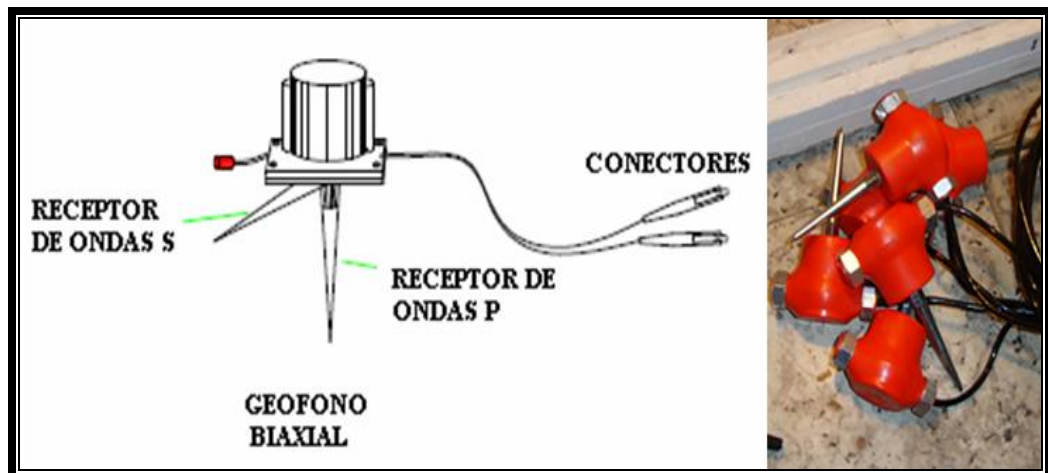


Figura.3.07 Esquema de geófono biaxial (izquierda) y modelo de geófono biaxial (derecha).<sup>4</sup>

- Geófonos triaxiales: utilizados para la medición de las componentes de movimiento vertical (V) y de las dos componentes en el plano horizontal en la direcciones perpendicular (H1) y paralela (H2) al eje de la línea de inspección. Este tipo de geófonos son utilizados para la medición de ondas P y ondas S, y forma parte del equipo utilizado en aplicación de los métodos de exploración en pozos tales como up-hole, down-hole y cross-hole. Los geófonos triaxiales exigen mayor resistencia mecánica que aquellos usados en la sismología tradicional debido a que en refracción se requiere geófonos con frecuencias naturales de vibración mucho mayores, entre 8 y 40 Hz. (ver figuras 3.08 y 3.09).

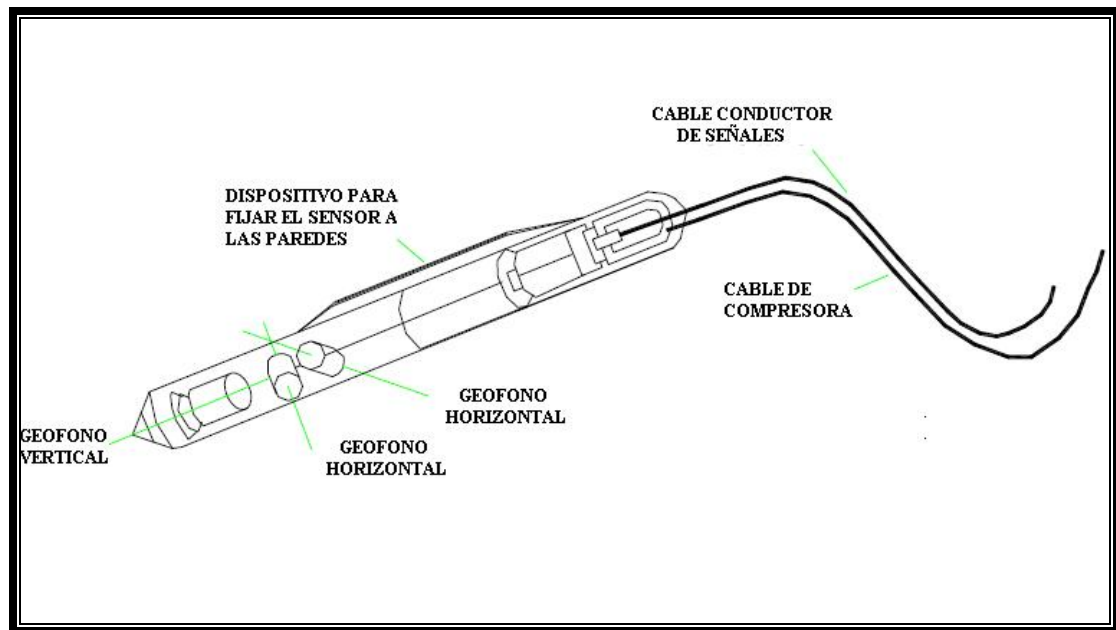


Figura.3.08 Esquema de geófono triaxial. <sup>4</sup>



Figura 3.09 Modelo de geófono triaxial. Cada componente de movimiento de los sensores triaxiales tiene sus respectivos cables de conexión.<sup>4</sup>

### 3.3.2 CABLE DE CONEXION DE GEOFONOS-SISMOGRAFO.

Los geófonos se conectan a un cable de conexión de geófonos que a su vez está conectado al sismógrafo (ver figura 3.10). Este cable es el que transporta las señales eléctricas transformadas por los geófonos. Además, tiene puntos de conexión eléctrica donde se conecta cada receptor a intervalos uniformes. El espaciamiento entre geófonos varía desde 1 m o mayores, todo en función del nivel de detalle definido por los objetivos de la investigación por refracción. Las conexiones entre los geófonos y los cables no son a prueba de agua, por lo que debe asegurarse que no se produzca un corto circuito por causas externas como césped húmedo, lluvia, entre otros. Para zonas o áreas cubiertas con agua superficial se requieren geófonos, cables de conexión de geófonos y conectores especiales a prueba de agua.



Figura 3.10 Cable de conexión de geófonos.<sup>4</sup>

### 3.3.3 SISMÓGRAFOS.

El sismógrafo cumple la función de recibir los impulsos eléctricos (voltajes) de los geófonos, amplificarlos y convertirlos de señales analógicas a señales digitales, que es la forma en que se almacenan los datos sísmicos. Algunos modelos tienen capacidad para realizar el procesamiento y finalmente, permitir la salida de datos en forma de un expediente o archivo digital. Por otra parte, los sismógrafos poseen canales para la recepción de señales enviadas por los geófonos, cuyo número corresponde a la cantidad de geófonos que puede ser conectado al mismo. Las señales son filtradas y digitalizadas de acuerdo con las opciones definidas por el usuario.

Existe una gran diversidad de sismógrafos que varían desde unidades de canal único hasta unidades multi-canales sofisticados. Los sismógrafos de los cuales se obtiene una mayor utilidad en la ingeniería muestran el registro de señales obtenidas de ondas sísmicas en un monitor digital incorporado.

En su selección hay que considerar puntos como<sup>23</sup>:

- Capacidad
- Procesado previo
- Salida de datos (analógica o digital)
- Trazas sísmicas. Domocrónica

#### **3.3.3.1 SISMÓGRAFOS CON CANAL ÚNICO.**

Es el más simple de los instrumentos utilizados en el ensayo de refracción y es usado con un único geófono, el cual es colocado en una ubicación fija y el suelo es excitado por medio de diferentes puntos de disparo, buscando que la distancia entre el geófono y el punto de disparo se incremente. El tiempo de arribo de la primer onda sísmica registrada es identificado en la traza de registro que se muestra en el monitor del sismógrafo. Para algunas condiciones geológicas simples y pequeños proyectos, la utilización de un sismógrafo de canal único es satisfactoria y puede ser usada para determinar la velocidad sísmica de una muestra de roca o de materiales para fines ingenieriles.

#### **3.3.3.2 SISMÓGRAFO MULTI-CANAL.**

Esta unidad puede utilizar 6, 12, 24, 48 o más geófonos. En un sismógrafo multi-canal, las señales de todos los geófonos son registradas simultáneamente. El monitor muestra las trazas de registro de cada geófono y permite al operador observar la tendencia de los datos para lograr un mayor grado de fiabilidad en los registros obtenidos y facilitar la

selección de los picos que determinan los tiempos de los primeros arribos<sup>24</sup> para cada geófono. (Ver figura 3.11 y 3.12).



Figura 3.11 Sismógrafo Oyo Corporación de 24 canales.<sup>1</sup>



Figura 3.12 Sismógrafo Modelo 16s de 12 y 24 canales<sup>21</sup>

---

<sup>24</sup> ASTM Designation D5777 (1995):“Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation”, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pa.

### **3.3.4 AMPLIFICADORES.**

Los amplificadores sísmicos son de diseño muy variado, pero todos ellos tienen como característica la alta fidelidad a las bajas frecuencias, ya que el rango de las señales de origen sísmico que normalmente se manejan se encuentra entre 2 y 200 ciclos por segundo. Pueden tener capacidad de amplificación desde 8 veces (18 decibeles) hasta dos millones de veces (126 decibeles). En la mayoría de los sismógrafos pueden operarse simultáneamente varios amplificadores, utilizando algunos elementos comunes, como fuente de poder, sistema de control, filtros, etc.

Cada amplificador recibe la señal de un geófono o arreglo de geófonos conectados al mismo cable conductor, constituyendo lo que se conoce como un canal de amplificación. Aquellos sismógrafos que operan muchos canales, en realidad no tienen tantos amplificadores como canales. Los sismógrafos utilizan dispositivos electrónicos que conectan en secuencias varios geófonos a un mismo amplificador (multiplicador) en un periodo de tiempo muy corto. Este dispositivo puede cubrir un ciclo completo de conmutación, que puede ser de 2 milisegundos, 4 milisegundos, etc., que adicionalmente puede ajustarse según sean las necesidades.

Al salir la señal del amplificador para alimentar a los sistemas de medición o registro, debe ser multiplicada, o sea invertido el proceso de conmutación.

### **3.3.5 UNIDAD DE CONTROL Y ALMACENAMIENTO.**

En ciertos modelos de sismógrafos, la unidad de control y almacenamiento consiste en una computadora portátil en la cual se ha instalado el sistema operativo empleado para

establecer los parámetros de adquisición y almacenamiento de datos (ver figura 3.13). En algunos modelos de sismógrafos, la interfase entre la computadora y el sismógrafo es a través de una caja NIB (Net Interface Box) y un cable especial de conexión entre la NIB y el sismógrafo.

### **3.3.6 FUENTE DE ENERGÍA SISMICA.**

Tomando en cuenta la gran variación de constantes elásticas que pueden presentar los diferentes tipos de suelos y estructuras geológicas del subsuelo, la energía sísmica necesaria para obtener información del subsuelo puede ser muy grande, cuanto más profunda sea la capa, y conforme aumente el número de cambios de medios elásticos, la energía susceptible de regresar a la superficie y ser detectada en los geófonos, disminuye rápidamente.



Figura 3.13 Unidad de control y almacenamiento.<sup>4</sup>



Las ondas que se utilizan en refracción son generadas por un evento sísmico artificial instantáneo. Lo que se busca con éste es generar el tipo de ondas sísmicas (de volumen y superficiales), producidas por un único “evento” de duración “instantánea”, para que no haya superposición de ondas, de eventos diferentes, en los movimientos del terreno detectados por los geófonos. Para esto se buscan fuentes de generación que se puedan controlar en términos del tiempo de inicio y localización.

Existen dos tipos de fuentes de energía: fuentes de impacto y cargas explosivas.

Las características y el procedimiento para la implementación del equipo utilizado en fuentes de impacto se detallan en la Tabla 3.02.

FUENTES DE ENERGIA	PROFUNDIDAD	EQUIPO	PROCEDIMIENTO
Fuentes de Impacto	Investigaciones Superficiales 5-10 m	Martillo de 4 a 7 Kg, Placa móvil	Se deja caer el martillo de 3 a 5 veces para verificar las señales en el sismógrafo. Un golpe a la placa sobre el piso o suelo es usado para que mejore el acoplamiento de la energía del martillo al suelo, y para la iniciación del movimiento sísmico (tiempo cero).
	Investigaciones Profundas en materiales secos y sueltos	Proyectiles, Mecanismos de caída de 45 a 225 Kg	Los primeros son descargados por debajo o encima de la tierra, los segundos se dejan caer de una altura de 3 m mediante un trípode y polea.

Tabla 3.02: Descripción de las fuentes de impacto. <sup>24</sup>

Las cargas explosivas son sustancias químicas que al reaccionar liberan una gran cantidad de energía, mediante procesos térmicos o de presión; la cantidad de energía liberada es muy grande comparativamente con el volumen de explosivo. Este tipo de fuente es utilizada en los casos en que se requiere investigar grandes profundidades y en sitios donde no exista riesgo de daños en estructuras o que puedan ocasionar derrumbes.

El explosivo industrial que proporciona la mayor relación de liberación de energía con respecto al volumen, es la nitroglicerina. En la práctica no se utiliza la nitroglicerina pura, sino mezclada con distintas sustancias que hacen menos peligroso su transporte y su manipulación.

Los explosivos se identifican por su potencia, que se entiende por la relación de energía liberada con respecto a la liberada por el mismo volumen de nitroglicerina. Los tipos de explosivos industriales más comunes se describen en la Tabla 3.03

TIPO	POTENCIA	CARACTERISTICAS
POLVORAS	5-20%	Mezcla refinada de salitre, azufre y carbón. Las proporciones definen la potencia. Se utiliza en polvo o granulada
DINAMITAS	30-60%	Mezcla de un explosivo y una sustancia neutra y pulvurenta. El explosivo puede ser: Nitroglicerina, nitrato de amonio, potasio y sodio. La sustancia puede ser: Aserrín, celulosa, polvo de aluminio, etc. Se utiliza en forma de goma, gelatina plástica y pulvurenta.

Tabla 3.03 Tipos de Explosivos Industriales más Comunes.<sup>1</sup>

En la exploración geofísica se utilizan exclusivamente dinamitas de la máxima potencia, en forma de cartuchos, los cuales requieren de un iniciador para hacerla detonar, siendo los estopones o cápsulas eléctricas (fulminante) los más comunes. Estos consisten de un pequeño tubo metálico relleno de pólvora, que se hace detonar por medio de una chispa eléctrica que brinca entre los extremos desnudos de dos cables.

Los explosivos que se utilizan en la prospección geofísica no se detonan al aire libre, porque generan una onda de aire superficial que produce una onda que interfiere con los movimientos sísmicos que viajan en el subsuelo.

Se acostumbra poner la carga de explosivo dentro del subsuelo, a través de una perforación. La profundidad a la que la carga es ubicada se determina mediante pruebas que indiquen la posición en que transmite energía con la máxima eficiencia.

Enterrar pequeñas cantidades de explosivos (menores que 0.5 Kg) a 1 o 2 m es efectivo para investigaciones de poca profundidad (menores que 100 m) si se rellena y taponea. Para investigaciones de grandes profundidades (debajo de los 100 m), mayores cargas explosivas (mayores que 0.5 Kg) son requeridos y usualmente son enterradas a 2 m de profundidad o más. El uso de explosivos requiere personal entrenado especialmente para el manejo y ejecución de procesos especiales.

Con objeto de mejorar la transmisión de la energía, siempre que sea posible, la carga se sitúa en una capa arcillosa o de bajo nivel hidrostático.

La cantidad necesaria de explosivos varía en función de las condiciones locales. Sin embargo, se admite que debe ser proporcional al cuadrado de la distancia entre el punto de disparo y el geófono más alejado de la línea de inspección, cuando esta separación es menor que 1000 m. En la mayoría de casos es suficiente una carga de 100 a 200 g para separaciones de 100 m entre el punto de disparo y el geófono más extremo.

En El Salvador el uso de explosivos (pólvoras y dinamita) como fuente de energía sísmica no son utilizados explosivos de alta potencia, debido a que el ensayo de

refracción sísmica es utilizado para un alcance en profundidad muy superficial (0-20m aproximadamente). Adicionalmente, el uso de explosivos es de uso prohibitivo.

Para las investigaciones usuales desarrolladas en proyectos de ingeniería civil, las fuentes de energía sísmica comúnmente utilizadas son mazos de 10 a 20 lbs de peso, mecanismos de caídas con pesos hasta de 100 lbs utilizando trípode y polea, y pistolas sísmicas que emplean cartuchos de escopeta.

### **3.3.7 SISTEMA DE DISPARO (TRIGGER).**

El sistema de disparo o trigger consiste en el envío de una señal a la unidad de adquisición de datos, mediante el cierre o apertura del circuito entre la fuente de energía y la unidad de adquisición de datos, al momento del impacto o explosión, para que éste de inicio a la toma de datos (tiempo cero) y registro de las ondas sísmicas<sup>4</sup> (ver figura 3.14 y 3.15).

El trigger se configura en el programa de cómputo a implementar. Esta configuración consiste en indicar si la señal a enviar es un aumento brusco del voltaje (cierre del circuito mediante un golpe) o un decremento brusco del mismo (apertura del circuito mediante una explosión). Cuando las condiciones del trigger se cumplen, se inicia la adquisición de datos simultáneamente por los canales configurados (1, 6, 12, 24, 48 o más, según el número de geófonos utilizados), a una velocidad de hasta 250,000 muestras por segundo. Cada canal adquiere un total de 1,000 datos en el tiempo prefijado en el programa, cantidad suficiente para el análisis de las ondas sísmicas.



Figura 3.14. Martillo y plato de golpe<sup>1</sup>



Figura 3.15. Sistema de disparo: interruptor de martillo (izquierda) y cable de extensión del trigger (derecha)<sup>1</sup>

### **3.4 METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DEL ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA, SEGÚN NORMA ASTM D-5777.**

Para el desarrollo de una inspección por refracción sísmica es necesario mencionar los factores más relevantes en su ejecución, lo cual incluye: 1. La calificación del personal, 2. Planeamiento de la inspección, 3. Ejecución del Ensayo y 4. La interpretación de los datos de refracción sísmica.

#### **3.4.1 CALIFICACIÓN DEL PERSONAL.**

El éxito de una inspección por refracción sísmica es dependiente de la competencia de la(s) persona(s) responsable(s) para el planeamiento, realización de la inspección e interpretación de los datos. El entendimiento de la teoría, procedimientos de campo, métodos de interpretación, así como el conocimiento de la geología del lugar es necesario para completar una inspección por refracción sísmica.

#### **3.4.2 PLANEAMIENTO DE LA INSPECCIÓN.**

Para la planeación de una inspección por refracción es de vital importancia los siguientes puntos: 1. Objetivos de la Inspección; 2. Valoración del Contraste de Velocidad Sísmica; 3. Selección del Método de Interpretación; y 4. Diseño de la Inspección.

##### **3.4.2.1 OBJETIVOS DE LA INSPECCIÓN POR REFRACCIÓN SÍSMICA.**

Respecto a los objetivos de la inspección por refracción, es importante visualizar el fin con el cual se pretende realizar y para que serán utilizados los resultados de la misma, pues esto definirá que tipo de inspección por refracción se deberá ejecutar. Los tipos de

inspecciones que se pueden ejecutar son: 1. Inspección de reconocimiento o preliminar; y 2. Inspección profunda o definitiva. La diferencia entre ambas es la cantidad de datos obtenidos y el nivel de detalle de la inspección, que esta relacionado directamente con el procedimiento de campo, y por ende, con el costo.

Si el fin de la investigación es, por ejemplo, la identificación de materiales en profundidad, determinación de espesores de estratos, detección del nivel freático, y la determinación de la facilidad de excavabilidad de los materiales en la subsuperficie, una inspección preliminar es suficiente. Para este tipo de inspección, la separación entre geófonos es mayor; pocos puntos de disparos son usados, la utilización de mapas topográficos o niveles manuales para ubicar las elevaciones son suficientes y el costo para obtener datos de refracción sísmica es relativamente bajo.

Por otra parte, si lo que se pretende es detectar fallas, cavidades subterráneas y la determinación de parámetros dinámicos in situ (cuando es difícil la tarea de extracción de muestras inalteradas), es recomendable realizar una inspección profunda. Para este tipo de inspección, la separación entre geófonos es corta, gran cantidad de puntos de disparo son usados, la elevación y localización de los geófonos y de los puntos de disparo son determinados con mayor exactitud y el costo de la obtención de datos de refracción sísmica es alto.

La consideración de los objetivos de la inspección por refracción y las características del sitio a investigar (la geología del lugar, la profundidad de la investigación, topografía, accesibilidad, actividades generadoras de ruido, limitaciones de espacio, restricciones en el uso de algunos dispositivos generadores de ondas, etc.) pueden determinar el equipo a

usarse, la cantidad de esfuerzo para la realización de la inspección, la selección del método de interpretación, y el presupuesto necesario para lograr los resultados deseados.

#### **3.4.2.2 VALORACIÓN DEL CONTRASTE DE VELOCIDAD SÍSMICA.**

Uno de elementos más críticos en el planeamiento de una inspección por refracción es la determinación de la existencia de un contraste o cambio apreciable de velocidad para la identificación de unidades geológicas o hidrológicas (estratos) de interés.

Donde haya duda sobre la existencia de un contraste apreciable de velocidad sísmica, la realización de una prueba de pre-inspección en un punto de control es deseable, donde la estratigrafía es conocida y las velocidades puedan ser determinadas. Tres tipos de pruebas de pre-inspección pueden ser consideradas: 1. Perfil sísmico vertical (PSV); 2. Registros de sondeos o perforaciones (registros de densidad o registro sísmico para proveer e indicar la velocidad de los estratos sub-superficiales); 3. Ensayo con una línea de inspección por refracción cerca de un punto de control conocido. Con esta información, la viabilidad en el uso del método de refracción sísmica en el lugar es asegurada.

#### **3.4.2.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE INTERPRETACIÓN.**

El nivel de detalle deseado y la complejidad geológica del sitio determinará el método de interpretación a ser usado, lo que a su vez determinará el procedimiento de campo a ser desarrollado. Respecto a los métodos de interpretación, este punto será abordado en el apartado 3.5.6 de este capítulo.



### **3.4.2.4 DISEÑO DE LA INSPECCIÓN.**

#### **A. LOCALIZACION DE LAS LINEAS DE INSPECCION.**

La localización preliminar de la línea de inspección por refracción es hecha con ayuda de mapas topográficos y fotos aéreas en el caso de no realizar una visita al lugar. Estas consideraciones podrían estar contempladas cuando: 1. Exista la necesidad de ubicar los receptores en la línea de inspección; 2. Exista cercanía a puntos de control para la realización de chequeo de datos; 3. No se cuente con información sobre la accesibilidad al sitio de interés; 4. No se cuente con información sobre la localización y extensión de alguna superficie plana (de concreto o asfalto), la existencia de estructuras enterradas (tuberías, bóvedas, etc.) y fuentes de ruido cultural o ambiental presentes en el sitio. Frecuentemente, la localización de la línea de inspección será determinada por la topografía. En otras ocasiones, la localización será dependiente de la ubicación de perforaciones realizadas previamente a la realización de la inspección por refracción y que, por lo general, se ubican en sectores donde se tiene proyectada la construcción una estructura determinada (edificios, tanques, carreteras, etc.)

#### **B. COBERTURA.**

La cobertura y orientación de las líneas de inspección pueden diseñarse para cubrir los objetivos de la inspección por refracción. Por otra parte, el área cubierta por la inspección podrá ser más grande que el área de interés, para que las mediciones sean tomadas en las condiciones propias del lugar o sobre alguna condición anómala. Estas consideraciones podrían estar dadas para la orientación de líneas de inspección con

respecto a rasgos geológicos de interés, tales como: canalizaciones enterradas, fallas o fracturas, etc.

El número y localización de los puntos de disparo dependerá del método escogido para coleccionar e interpretar los datos. El espaciamiento de los geófonos es determinado por dos factores: a. La profundidad esperada de la(s) interfase(s) o contacto (s) geológico (s); y, b. La resolución lateral o grado de definición deseado de la interfase.

La separación entre los geófonos y el punto de disparo será lo más larga posible para la localización de interfases más profundas; y será más corta para la ubicación de interfases poco profundas.

Para definir la superficie de la interfase en detalle, el espaciamiento del geófono puede ser más pequeño que el tamaño de los cambios espaciales en la interfase. Si la longitud de la línea de inspección y la separación entre la fuente y los geófonos no es suficiente para alcanzar la máxima profundidad de investigación, entonces la separación entre la fuente y el geófono puede ser aumentada hasta que una profundidad suficiente sea obtenida. Si la longitud de la línea de inspección es más larga que un único arreglo o tendido de geófonos, los datos pueden ser obtenidos usando tendidos múltiples. Una línea de inspección usando tendidos múltiples puede ser para una inspección preliminar o para una inspección definitiva.

Importante es la definición la cantidad y longitud de la línea de inspección por refracción.

La cantidad de líneas de inspección estará en función de la cantidad de información que se solicite, el área a cubrir y la importancia del proyecto a ejecutar.

La longitud de la línea de inspección estará en función de las dimensiones del sitio de interés, y la profundidad de la cual se requiere información. La longitud de la línea de inspección puede ser de tres a cinco veces la profundidad ( $L = 3Z - 5Z$ ).

### **3.4.3 EJECUCION DE LA INSPECCIÓN.**

#### **3.4.3.1 CHEQUEO PREVIO DEL PLAN DE INSPECCIÓN EN EL SITIO DE INTERÉS.**

Una inspección visual sistemática podría ser hecha al llegar al sitio para determinar si el plan de inspección inicial es factible. Caso contrario, modificaciones al plan podrían ser requeridas. Si una prueba de factibilidad no ha sido realizada previamente, los resultados iniciales en las mediciones pueden ser usadas para confirmar la existencia de un adecuado contraste o cambio de velocidad, y también puede ser usadas para verificar la presencia de señales producto del ruido en el sitio. Resultados de estas mediciones iniciales pueden indicar la realización de cambios en el plan de inspección original.

#### **3.4.3.2 PROCEDIMIENTO DE CAMPO PARA LA REALIZACIÓN DE LA INSPECCIÓN.**

- En primer lugar, se recomienda aislar el *sitio* donde se realizará la inspección por refracción, especialmente del ingreso de vehículos y de personas ajenas al grupo de técnicos de campo.

- Realización de un recorrido previo por el sitio, para la verificar las condiciones del mismo (limpieza, topografía, clima, drenaje natural, nivel de ruido, etc.) antes de proceder a la ubicación de la línea de inspección.
- Chequeo de la información inicial requerida. Debe indicarse la cantidad, longitud y ubicación de las líneas de inspección. Si alguna de las líneas de inspección no es posible realizarla en el lugar o con la longitud prevista, se deberá justificar cualquier cambio.
- Trazo de la línea de inspección. Haciendo uso de la cinta métrica se marcarán sobre el suelo, en línea recta, la separación a la cual deben espaciarse los geófonos, dependiendo de la cantidad de canales a utilizar y de la longitud de la línea (ver figura 3.16). En la Tabla 3.04 sirve de guía para este propósito, cuando se utiliza sismógrafos de 12 y 24 canales (geófonos) para la realización de una inspección típica. Separaciones de 3 m entre geófonos es apenas suficientemente para conseguir bastantes datos sobre la velocidad del estrato superficial para una inspección de reconocimiento<sup>25</sup>. Separaciones de 1.5 m serán utilizadas para una inspección definitiva<sup>25</sup>. Las marcas de la ubicación de geófonos se harán con cal o yeso. De igual forma se traza la ubicación de los puntos de disparo (ver figuras 3.17 y 3.18). La longitud de la línea de inspección por refracción debe ser mayor que el doble de la profundidad a la que se encuentra la interfase o cambio de estrato<sup>22</sup>

---

<sup>25</sup> U.S. Army Corps of Engineers, (August 1995): “Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations”, Washington D.C., U.S.A.

Separación de Geófonos (m)	Cantidad Canales	
	12	24
1.5	16.5	34.5
2.0	22.0	46.0
2.5	27.5	57.5
3.0	33.0	69.0
3.5	38.5	80.5
4.0	44.0	92.0
4.5	49.5	103.5
5.0	55.0	115.0
5.5	60.5	126.5
6.0	66.0	138.0

Tabla 3.04 Longitud de la línea (metros), según cantidad de canales y separación de geófonos.<sup>1</sup>



Figura 3.16 Trazo de la línea de inspección en la que se ponen marcas para ubicar c/u de los geófonos y la fuente de energía.<sup>4</sup>



Figura 3.17 Configuraciones utilizadas para la realización de ensayos de Refracción Sísmica, utilizando cuatro puntos de disparo (sismógrafo de 12 canales).<sup>4</sup>

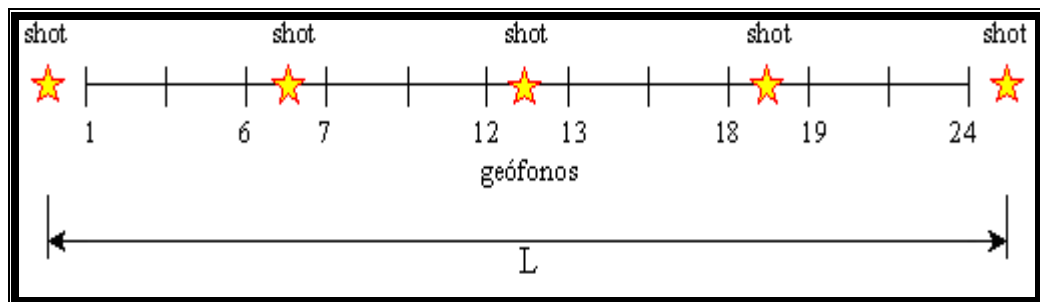


Figura 3.18 Configuraciones utilizadas para la realización de ensayos de Refracción Sísmica, utilizando cinco puntos de disparo (sismógrafo de 24 canales).<sup>4</sup>

- Los geófonos verticales de 14 Hz se colocan en los puntos marcados. El geófono debe ser introducido a presión y no debe golpearse para lograr la penetración de la espiga (ver figura 3.01). La espiga debe introducirse lo suficiente para asegurar la fijación del geófono. Si la espiga no puede introducirse a presión, se perforará primero un agujero con la punta de

5/8", procurando que la profundidad del mismo sea un poco menor a la longitud de la espiga. La colocación inapropiada de los geófonos es un problema común que resulta en una detección pobre de las señales de ondas P. A menudo, una sección de unos 10 cm en la parte superior de una capa suelo podría ser removida para que el geófono pueda ser colocado sobre suelo firme. Donde la roca está expuesta en la superficie, la base del geófono puede ser reemplazada por un trípode base.

- El cable de conexión de los geófonos se tiende y debe ser puesto fuera de la línea de geófonos a lo largo de una línea recta. Preferentemente se recomienda colocarlo al lado izquierdo del arreglo de geófonos (tomando como referencia la ubicación del sismógrafo) y se conectan los geófonos al cable (Ver figura 3.19).
- La manera más simple para generar la energía sísmica en el (los) punto(s) de disparo(s), es producir un impacto en el suelo con un martillazo. Este procedimiento tiene el inconveniente de que la energía que se genera es de poca cuantía y aunque pueda utilizarse martillos más pesados, su manejo no siempre es fácil y la energía generada no penetra mucho en el subsuelo. Cuando se utilizan impactos con martillos, deberán hacerse sobre una placa o en terrenos en los cuales se pueda colocar un dispositivo que genere un impulso eléctrico en el instante preciso en que se produzca el impacto, con el objeto de tener una referencia en tiempo, de la iniciación del movimiento sísmico (tiempo cero). El dispositivo

utilizado como fuente de energía es un mazo de 20 libras, adecuado con un interruptor especial para marcar el tiempo cero, y una placa de acero de 15x15cm y 16 mm de espesor, que se coloca sobre el suelo y recibe el golpe del mazo.

- La ubicación del punto de disparo al final de la línea de inspección debe estar desplazada en un ángulo recto. El propósito del desplazamiento en ángulo recto es permitir la determinación de tiempos totales o sea, el tiempo de viaje para recorrer la distancia existente entre cada punto de disparo y el geófono más lejano. La distancia de desplazamiento entre la línea de inspección y el punto de disparo, usualmente tiene un intervalo de valores entre 1.5 a 4.5 m, el cual provee un arribo de ondas directas a través del estrato superficial, con lo que se determina de su velocidad.<sup>22</sup>
- La ubicación de los puntos de disparo más allá del extremo es para registrar los tiempos de los primeros arribos de ondas refractadas desde un estrato que se está tratando de trazar, y para registrar esas refracciones en la mayor cantidad de geófonos. Aunque no existe una regla para definir la separación entre el punto de disparo y el geófono más cercano, una separación más o menos entre la mitad de la longitud total del cable usualmente es adecuado. Los arribos de las ondas provenientes del estrato superficial (ondas directas) son detectados únicamente dentro de 9 m a partir del punto de disparo.<sup>22</sup>



- El cable de extensión del disparador o trigger se despliega paralelo al tendido de los geófonos, pero no debe cruzarse con el cable de conexión de geófonos. Preferentemente se recomienda colocarlo al lado derecho del arreglo de geófonos (tomando como referencia la ubicación del sismógrafo). Ver figura 3.19.
- Conexión de todo el equipo: batería de 12V, cable de geófonos, cable del disparador, cable de interfase digital, computadora (ver figura 3.20).

Inicialización de Parámetros de Adquisición. En este punto se debe asignar un nombre a la exploración, se toma nota de la fecha y ubicación del sitio, número correlativo de la línea de inspección y del(os) punto(s) de disparo utilizado(s), unidades de medida a utilizar, ubicación (posición y elevación), espaciamiento y cantidad de geófonos a utilizar, localización de geófonos y puntos de disparo, intervalo de muestreo y longitud del registro (referido al valor mínimo de los intervalos mostrados del eje de la abscisa “tiempo” de la figura 3.04 y tiempo de duración total del registro, respectivamente), utilización de filtros de reducción de señales de ruido en el proceso de adquisición de datos, especificación del uso de apilamiento o suma de datos de la utilización de golpes sucesivos para mejorar la señal sísmica, utilización de pre-amplificadores de ganancia en cada canal (geófono) del sismógrafo.



Figura 3.19 Ubicación de cable de conexión de geófonos (izquierda) y del dispositivo disparador o trigger (derecha).<sup>4</sup>

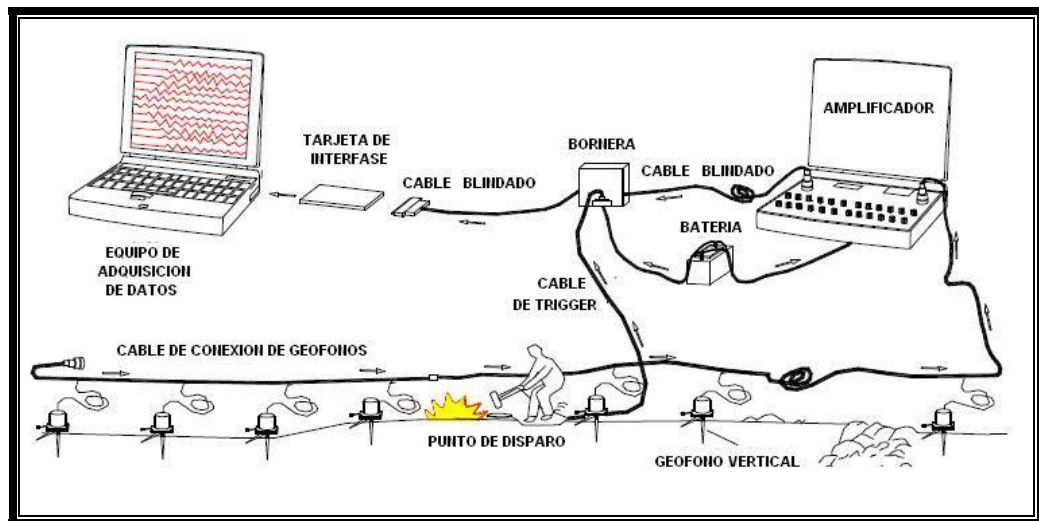


Figura 3.20 Disposición del Equipo para el Ensayo de Refracción Sísmica.<sup>4</sup>

- Realizar de una prueba para verificar el funcionamiento de los geófonos conectados al cable conductor de señales. Por lo general cuando todo el equipo esta conectado y ubicado en su lugar, un integrante del grupo de técnicos de campo realiza una revisión pasando junto a cada geófono, y el técnico encargado del manejo del sismógrafo verifica en el sismógrafo si existe un registro de señales obtenidas en cada geófono debidas a esta actividad.
- Realización de una prueba para la determinación del nivel de ruido ambiental en el sitio, lo que ayudará para definir el conjunto de filtros (Lowcut y Highcut) a ser utilizados para eliminar dicha influencia en los registros (ver especificaciones del sismógrafo).
- Proceda a realizar la adquisición de datos en la línea de inspección, haciendo que exista una proporción adecuada de ruido en la señal para que las primeras llegadas puedan ser determinadas con claridad. No se debe de olvidar que la ubicación del punto de disparo se modifica conforme se va desarrollando la inspección por refracción. Se debe identificar la línea de inspección utilizada y la ubicación del punto de disparo para la obtención de señales sísmicas.
- Se ubica la placa de impacto en la marca respectiva, dándole unos pocos golpes para fijarla. Se da la señal para que el auxiliar golpee la placa con el mazo. Al golpear la placa, el interruptor del martillo emite una señal

que indica al sismógrafo el momento en que comience a registrar las señales.

- Se procede a almacenar el registro obtenido de la fuente de energía utilizada en cada punto de disparo (ver figura 3.21).

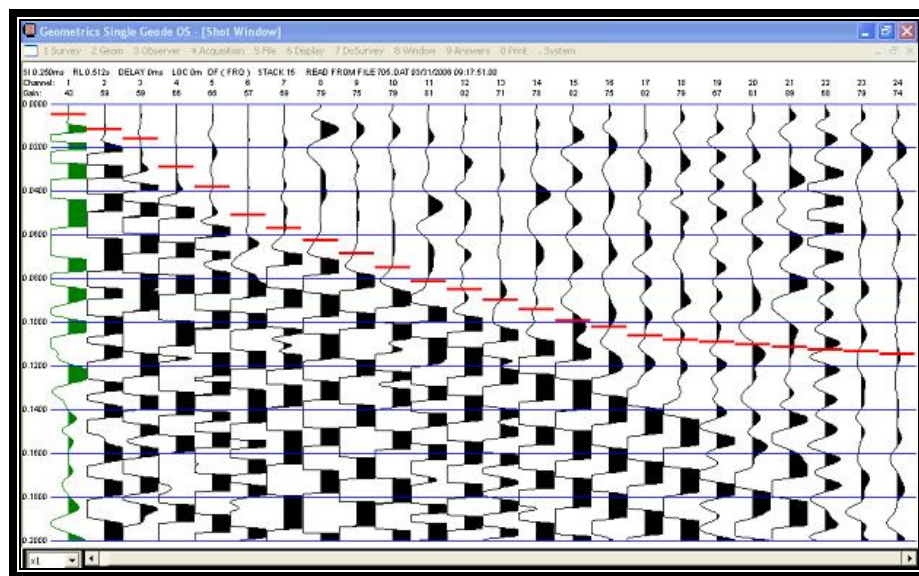


Figura 3.21 Ejemplo del registro obtenido de la fuente de energía para un punto de disparo determinado.<sup>4</sup>

### 3.4.3.3 CONTROL DE CALIDAD.

Los siguientes puntos son recomendados para proveer un control de calidad en las operaciones de campo y en la adquisición de datos:

- Deben tenerse al alcance documentación sobre los procedimientos de campo y los métodos de interpretación que serán utilizados en el estudio. El método de interpretación, a menudo, determinará los procedimientos de campo. En otros casos, los procedimientos de campo y las condiciones

geológicas del sitio pueden limitar el uso de ciertos métodos de interpretación.

- Debe elaborarse reportes diarios en una bitácora de campo para el registro de los procedimientos operacionales usados en el proyecto.
- Debe elaborarse reportes sobre cambios en los planes de realización de procedimientos de campo.
- Debe elaborarse reportes de las condiciones que puedan reducir la calidad de los datos, como el caso de condiciones climáticas, fuentes de ruido natural y cultural, etc.
- Si los datos están siendo registrados por medio de un equipo de adquisición de datos, es recomendable que los datos sean revisados tan pronto como sea posible para chequear su calidad.
- Cuidado especial debe tomarse para mantener la precisión en el registro de los tiempos con el sismógrafo.
- Debe de asegurarse la utilización de un método uniforme para la determinación de los picos en las trazas de registro de cada geófono (ver figura 3.20), para la obtención de los tiempos de los primeros arribos.
- Durante ó después del proceso de adquisición de los datos, las curvas t-x podrían ser graficadas para asegurar que los datos obtenidos son de una calidad y cantidad adecuada para aplicar el método de interpretación a utilizar para la definición de la interfase de interés.

- La realización de mediciones conjugadas de refracción sísmica, llamados medición directa (o normal) y medición inversa (o reversa), son necesarias para obtener una resolución más detallada de estratos con un desnivel o inclinación constante (ver figura 3.22). En el primero, el punto de disparo se ubica en un extremo de la línea de inspección a una distancia conocida al geófono más próximo, mientras que en el segundo, el punto de disparo se ubica al otro extremo de la línea de inspección a la misma distancia.

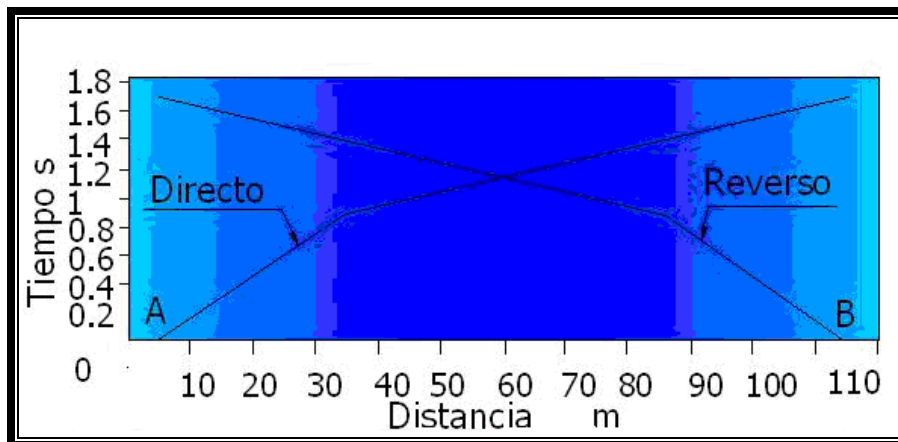


Figura 3.22 Ejemplo de domocrónicas (curvas t-x) obtenidas de mediciones conjugadas.<sup>1</sup>

- En adición a las curvas t-x, tres herramientas adicionales pueden ser usadas como herramientas de control de calidad para los datos de refracción sísmica: la prueba de irregularidad, la prueba de reciprocidad (ver sección 3.5.5.2) y la prueba de paralelismo (ver sección 3.5.5.4). La prueba de irregularidad chequea la consistencia de los tiempos de viaje a

lo largo del perfil de refracción. Si hay desviaciones de la pendiente de los segmentos de línea trazadas sobre la domocrónica o curva t-x, relacionada a un refractor en particular:

- a. Los tiempos de los primeros arribos (tiempos picos) pueden estar en un error;
  - b. Las curvas t-x pueden tener un error en la entrada de datos o en el proceso de graficación;
  - Los datos pueden ser producto del ruido; o
  - d. Las condiciones geológicas pueden ser altamente variables.
- Finalmente, un chequeo podría ser realizado para determinar si la profundidad y la velocidad sísmica obtenida usando el método de refracción sísmica tienen sentido geológico.

#### **3.4.3.4 CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN.**

Un chequeo periódico debe ser realizado en el equipo. También podría realizarse un chequeo después de cada problema y de cada reparación. El chequeo operacional del equipo podría ser llevado a cabo antes de cada proyecto y antes de iniciar cada día el trabajo de campo, esto puede realizarse según las recomendaciones del fabricante que se especifican en los manuales de los equipos.

#### **3.4.4 INTERPRETACIÓN DE DATOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA.**

##### **3.4.4.1 MÉTODO DE INTERPRETACIÓN.**

La cantidad de esfuerzo para la realización de la inspección relacionado con las actividades de campo y de interpretación dependerá de los objetivos de la inspección y del nivel de detalle deseado, que a su vez determinará el método de interpretación a

utilizar. Un problema inherente en todos los estudios geofísicos es la correlación no única entre los posibles modelos geológicos y un único conjunto de datos de campo. Lo anterior se refiere al hecho de que un único conjunto de datos de estudios geofísicos puede estar relacionado a gran variedad de modelos geológicos. Esta ambigüedad puede ser resuelta solo a través de datos geológicos y de la experiencia del interpretador.

El primer paso en el proceso de interpretación es la determinación del intervalo de tiempo a partir de un impacto en la fuente sísmica hasta el primer arribo de energía para cada geófono. Correcciones para los tiempos de viaje por elevaciones y otros factores geométricos pueden ser realizadas. Los dos tipos principales de correcciones son por elevación y por factores climáticos. Con las correcciones realizadas a los datos de tiempos de viaje, un gráfico de los tiempos de arribo versus distancia entre los puntos de disparo y los geófonos (curva  $t-x$ ) pueden ser construidos. Las líneas entonces son ajustadas a estos puntos para completar una curva  $t-x$ . Cada línea recta define las diferentes velocidades como consecuencia de los distintos estratos presentes en el subsuelo investigado. Los quiebres que se obtengan al dibujar las líneas rectas, se usaran para determinar las profundidades de cada estrato. Estas curvas son el fundamento para la interpretación de la refracción sísmica y de los cuales se obtienen dos tipos de información:

1. Velocidades de propagación de las ondas longitudinales ( $V_p$ ) para cada estrato, con las que se pueden identificar composiciones del material que la forma y sus propiedades dinámicas;
2. El espesor de cada estrato.



Algunos tipos de curvas pueden dar lugar a diferentes interpretaciones. Si esto sucede, será necesario llevar a cabo investigaciones posteriores, o bien, realizar cualquiera de los siguientes pasos:

- Realizar la medición en sentido inverso (reverso) a la que se hiciera en la medición inicial (sentido directo o normal);
- Tomar lecturas a partir de puntos de disparo suplementarios, ya sea para extender la línea de inspección o para llenar puntos intermedios entre estaciones;
- Tomar lecturas adicionales en aquellos puntos donde las lecturas son dudosas;
- Realizar prospecciones sobre tendidos adicionales con el geófono hacia atrás o hacia delante a lo largo de la línea de inspección; pero, algunas veces, es útil moverlo de la línea de inspección hacia un lado o rotarla.

#### **3.4.4.2 INTERPRETACIÓN PRELIMINAR.**

Una interpretación de los datos de campo podría ser clasificada como preliminar y debe ser usada con precaución debido a que es fácil cometer errores en una interpretación inicial de campo y un análisis preliminar nunca es una interpretación completa y detallada. Un análisis en campo es hecho principalmente como una herramienta de control de calidad.

#### **3.4.4.3 VERIFICACIÓN DE LA INTERPRETACIÓN DE LA REFRACCIÓN SÍSMICA.**

La interpretación de los datos de refracción sísmica puede ser verificada con los datos de perforaciones realizadas en el mismo sitio o con información adicional de la subsuperficie. Si dicha información no está disponible, este factor podría ser mencionado dentro del informe de campo.

#### **3.4.4.4 PRESENTACIÓN DE DATOS.**

En algunos casos, puede haber necesidad de una presentación formal de los datos o de los resultados de la interpretación. La interpretación final de la refracción sísmica es usada para refinar o confirmar un modelo de la geología o hidrología del sitio en estudio. Cada modelo es la caracterización simplificada de un sitio en estudio, e incorpora todos los rasgos esenciales de un sistema geofísico. Este modelo es usualmente presentado como una sección transversal, un mapa de contorno, u otros gráficos que ilustren las condiciones geológicas e hidrológicas generales y alguna condición anómala del sitio.

#### **3.4.5 CONTENIDO DEL REPORTE DE UNA INSPECCION DE REFRACCION SISMICA.**

Lo siguiente es una lista de puntos claves que podrían estar contenidos dentro de la mayoría de reportes. En algunos casos, no hay necesidad de un reporte formal extensivo. El reporte podría incluir una discusión de:

- El propósito y alcance de la inspección de refracción sísmica.

- El marco geológico.
- Limitaciones de la inspección de refracción sísmica.
- Las suposiciones realizadas.
- Las aproximaciones de campo, incluyendo una descripción del equipo y los parámetros usados en la adquisición de datos.
- La localización de la línea de inspección por refracción sísmica en un mapa del sitio.
- El esquema de ubicación entre puntos de disparos y los geófonos.
- Las aproximaciones usadas para la determinación de los picos para los primeros arribos.
- Las correcciones aplicadas a los datos de campo, y la justificación para su uso.
- Los resultados de las mediciones de campos, copias de registros de campo típicos y las curvas tiempo-distancia (t-x).
- El método de interpretación usado (método tiempo intercepto, método común recíproco o el método recíproco generalizado) y específicamente el método analítico o software que fue utilizado.
- Los resultados interpretados y alguna calificación e interpretación alterna.
- El formato de datos registrados (por ejemplo, cuaderno, registros en formato análogo, formato digital, etc.).

- Si ocurren situaciones donde se presentan variaciones necesarias diferente a lo indicado por esta guía ASTM, la razón para la realización de dicha variación podrían ser expuesta.
- La identificación de la(s) persona(s) responsable (s) de la inspección por refracción sísmica y la interpretación de datos.

### **3.5 TEORIA BASICA SOBRE EL METODO DE REFRACCION SÍSMICA.**

#### **3.5.1 SUPOSICIONES DEL METODO DE REFRACCION SISMICA.**

Se supondrá que se cumplen las condiciones siguientes:

- Las diferentes capas del subsuelo son homogéneas e isotrópicas.
- El dispositivo sísmico, constituido por los puntos de disparo y los receptores, es rectilíneo.
- Los diferentes contactos geológicos o interfaces (conocidos también como refractores) admiten un solo plano perpendicular que pasa por el dispositivo sísmico y sólo se considerarán las trayectorias contenidas en este plano.
- La velocidad de propagación de las ondas a través de estratos más profundos es mayor a la de aquellos más superficiales. (la velocidad aumenta en proporción a la profundidad).
- Los tiempos que se llevan a las curvas tiempo-distancia son los correspondientes a las primeras llegadas o primeros arribos.

### 3.5.2 TRAYECTORIAS DE LAS ONDAS.

Si un material con espesor  $Z$  y velocidad  $V_1$  que yace sobre otro material de velocidad  $V_2$  (ver fig. 3.23). Se supone que  $V_2 > V_1$  y que en el plano de separación de ambos medios se sitúa un dispositivo sísmico formado por un punto de disparo  $E$  y un arreglo de receptores  $S$  regularmente espaciados (ver fig. 3.23).

Las ondas generadas en el punto de disparo  $E$  pueden llegar a los receptores según cuatro trayectorias (ver fig. 3.23):

- Una trayectoria directa a lo largo de la superficie del suelo.
- Trayectorias reflejadas en el contacto de los dos medios.
- Trayectorias refractadas
- Trayectorias difractadas en el techo de la interfaz.

Las interfaces en las que se reflejan o refractan totalmente los rayos sísmicos constituyen las superficies sísmicas.

Para la comprensión del método de refracción sísmica basta con explicar las trayectorias directas y las refractadas.

- **Trayectoria directa:** – Se tiene  $t = \frac{ES}{V_1}$ , o lo que es igual

$$t = \frac{x}{V_1} \quad \text{Ecuación 3.01}$$

ecuación de una recta de pendiente  $1/V_1$  y que pasa por el origen.

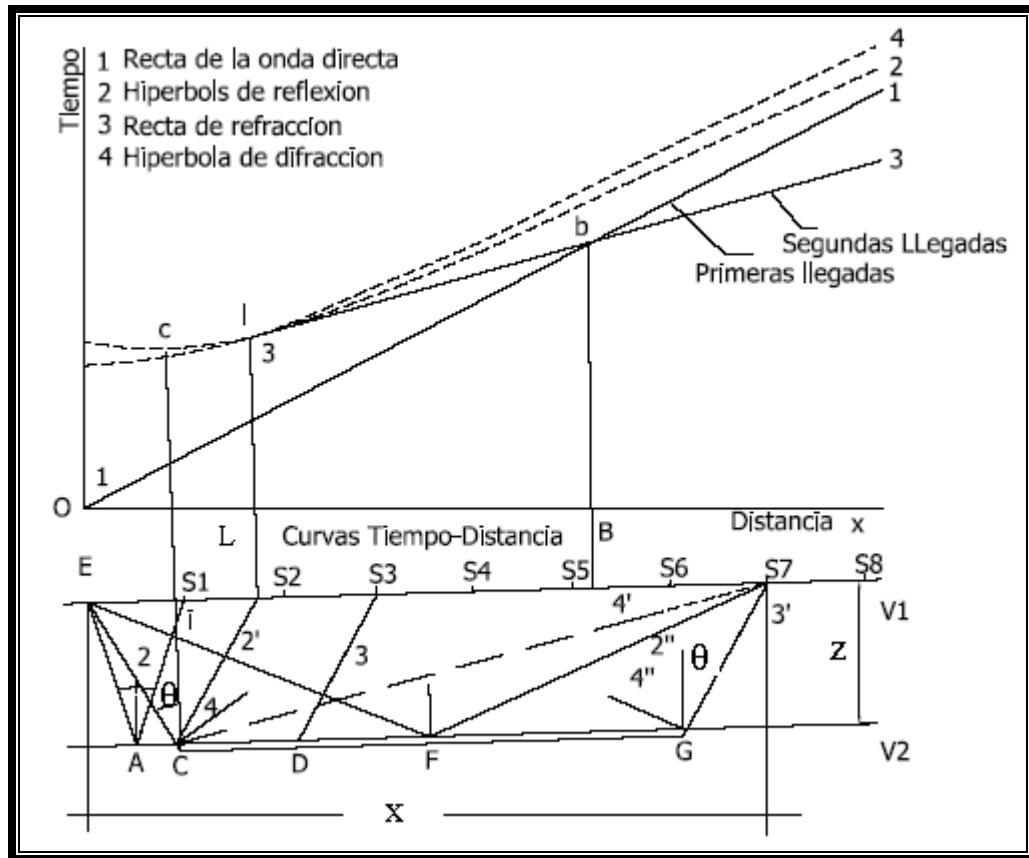


Figura 3.23 Curvas Tiempo-Distancia para diferentes trayectorias de ondas. 1: Trayectoria Directa; 2,2',2'': Trayectorias Reflejadas; 3,3': Trayectorias Refractadas; 4,4',4'': Trayectorias Difractadas.<sup>1</sup>

- **Trayectorias refractadas:** - Consideremos nuevamente el receptor  $S_7$ .

Se tiene:

$$t = \frac{EC}{V_1} + \frac{CG}{V_2} + \frac{GS_7}{V_1}$$

Como el ángulo de incidencia  $\theta_1$  y el de emergencia son iguales a  $\arcsin V_1/V_2$

se verifica que

$$EC = GS_7 = \frac{Z}{\cos \theta}$$

$$CG = x - 2 Z \operatorname{tg} \theta$$

de donde

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2Z}{V_1 \cos \theta} - \frac{2Z \operatorname{tg} \theta}{V_2}$$

y como  $V_1 = V_2 \operatorname{sen} \theta$ , puede ponerse

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2Z \cos \theta}{V_1} \quad \textbf{Ecuación 3.02}$$

ecuación de una recta de pendiente  $\frac{1}{V_2}$  y cuya ordenada en el origen vale

$$\frac{2Z \cos \theta}{V_1}.$$

De la figura 3.23 se aprecia que una onda refractada no puede llegar a ningún receptor si su abscisa es menor que EL, es decir, si  $x < 2Z \operatorname{tg} \theta$ .

A este valor “x” se le conoce como distancia crítica o crossover distance, “Xc”, cuyo significado físico es la separación entre el punto disparo y el punto donde emerge la primera onda refractada, proveniente del contacto geológico o interfase. En función de la velocidad de recorrido de ondas en los estratos superior e inferior y de la profundidad de la interfase o frontera entre ellos, la distancia crítica puede ser menor que la longitud de la línea de inspección en observación. A medida que aumenta la relación  $V_2/V_1$ , la relación  $Xc/Z$  disminuye.

Como regla práctica, la longitud de la línea de inspección por refracción debe ser mayor que el doble de la profundidad a la interfase para observar refracciones sin interferencias debidas de las ondas P originales.

La comparación de las curvas tiempo-distancia de la figura 3.23 pone de manifiesto que las primeras ondas que llegan a los receptores son las directas, en la proximidad del punto de disparo, y las refractadas, cuando la longitud de la línea de inspección es mayor la distancia crítica. En una segunda etapa llegan, a medida que el receptor se separa del punto de disparo, las ondas reflejadas, las difractadas y la onda directa; para las ondas refractadas y directas se habla entonces de segundas llegadas.

Mientras que las primeras llegadas de la onda directa y de las ondas refractadas son fáciles de descubrir, al menos en dispositivos cortos, las segundas llegadas de estas trayectorias de ondas fácilmente pueden pasar desapercibidas.

### **3.5.3 SISMOGRAMA.**

Un sismograma consiste en un conjunto de registros sísmicos, que gráficamente se muestran como un grupo de trazas.

A cada punto de recepción le corresponde una traza. Las trazas, poco agitadas antes del impulso, señalan la llegada de las ondas directas y refractadas por una perturbación notable. En ocasiones las llegadas no producen más que una pequeña agitación en las trazas, la cual es fácilmente observable. El cálculo de los tiempos se realiza con ayuda de la traza que da el instante inicial y un sistema de líneas normales a los bordes del sismograma.

Con frecuencia, sacudidas parásitas provocadas por el desplazamiento de personas, animales o vehículos producen perturbaciones en los registros. El viento es un importante agente perturbador, tanto porque azota directamente a los geófonos como porque sacude la vegetación; por este motivo se entierran los geófonos, lo que permite



mejorar el acoplamiento con el terreno. Si el sismógrafo lleva incorporada una pantalla que permita seguir las oscilaciones de los receptores, el operador puede elegir un momento de calma relativa para aplicar un impulso en el punto de disparo y obtener un registro mas claro.

La utilización de la mayor cantidad de geófonos tiene por objeto reforzar las llegadas en fase, es decir, la de las ondas sísmicas. Por otro lado, se pretende debilitar las llegadas que no están en fase, es decir, las de las ondas parásitas. (Ver figura 3.24)

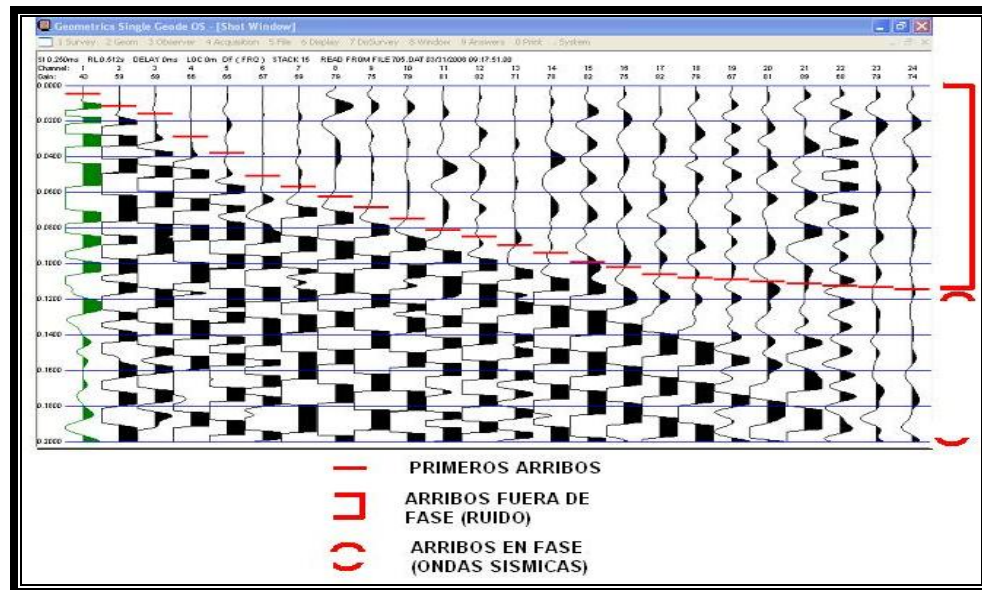


Figura 3.24 Ejemplo de un Sismograma y tipos de arribos detectados.<sup>4</sup>

En algunos casos, el pico del primer arribo en uno o más geófonos puede ser incierto; entonces se puede contar con la experiencia del interpretador. Si esto es hecho, estos picos podrían ser anotados. Si un programa de cómputo es usado para determinar los picos de los primeros arribos, estos picos pueden ser chequeados (y reajustados si es

necesario) haciendo el procesamiento e interpretación de manera individual en el registro de cada geófono (ver figuras 3.21 y 3.24).

Correcciones para los tiempos de viaje por elevaciones y otros factores climáticos pueden ser realizadas, para proceder a construir un gráfico de los tiempos de arribo versus distancia entre los puntos de disparo y los geófonos (curva t-x).

#### **3.5.4 CURVAS TIEMPO-DISTANCIA (CURVA T-X).**

Al representar los tiempos empleados por las ondas en llegar a los receptores a partir de un conjunto de puntos de disparo, es posible obtener igual número de curvas tiempo-distancia características de las condiciones geológicas locales. Las curvas tiempo-distancia correspondientes a trayectorias refractadas se llaman domocrónicas o domocronas.

Una vez construidas las curvas, se procede a la identificación de las secciones que pertenecen a un mismo refractor, por medio del trazo de líneas que son ajustadas a los puntos que pertenecen a cada curva t-x.

Así, cada línea recta define las diferentes velocidades como consecuencia de los distintos estratos presentes en el subsuelo investigado. Los quiebres que se obtengan al dibujar las líneas rectas, se usarán para determinar las profundidades de cada estrato. Estas curvas son el fundamento para la interpretación de la refracción sísmica y de los cuales se obtienen dos tipos de información: 1. Velocidades de propagación de las ondas longitudinales ( $V_p$ ) para cada estrato, con las que se pueden identificar composiciones del material y sus propiedades dinámicas; 2. El espesor de cada estrato.

Para cualquier *curva t-x* que solo tenga una línea recta puede concluirse que el subsuelo investigado consiste en un estrato uniforme cuya velocidad se obtendrá de la pendiente de la línea recta. Si “ $X_m$ ” es la mayor distancia entre el punto de disparo y el geófono en la línea de inspección, también puede concluirse que la profundidad mínima a la que se extiende el estrato uniforme será de  $X_m/3$ .

Para una curva *t-x* que consta de dos líneas rectas, se concluye que el subsuelo investigado esta formado por dos estratos cuyas velocidades son  $V_1$  y  $V_2$  (donde  $V_2 > V_1$ ) y cuya discontinuidad o separación se encuentra a una separación “ $Z$ ”. La profundidad mínima a la que se extiende el estrato subyacente (con velocidad  $V_2$ ) será  $X_m/3$  nuevamente. Entonces, puede concluirse que se tendrán tantos estratos como líneas diferentes se obtengan en la curva *t-x*.

Hay algunas características del subsuelo que se pueden prestar para malas interpretaciones, a saber:

- Un cambio de pendiente del curva tiempo-distancia no significa necesariamente un cambio de refractor, sino que puede significar un cambio de pendiente del primer refractor.
- Cuando existe un estrato o una capa delgada de suelo cuya velocidad es menor que la de la capa superior, no hay refracción crítica, de tal manera que no habría indicios de su presencia en las primeras llegadas en cada punto de la línea de inspección.

- Cuando existe una capa demasiado delgada, a pesar de tener velocidades mayores no alcanza a producir primeros arribos por el hecho mismo de ser tan delgada

### **3.5.5 PRINCIPIOS GENERALES DE INTERPRETACIÓN EN REFRACCIÓN**

Hay 5 principios generales que conforman la base para la interpretación de un conjunto de datos de refracción sísmica. Dichos principios se mencionan a continuación:

1. Leyes de Snell.
2. Ley de las velocidades aparentes.
3. Principios de reciprocidad.
4. Principio del tiempo de intercepto en el origen.
5. Principio de paralelismo.

El primero fue explicado brevemente en el Apartado 2.4.1.4 del Capítulo II. A continuación se explicarán los otros cuatro principios

#### **3.5.5.1 LEY DE LAS VELOCIDADES APARENTES.**

La ley de las velocidades aparentes dice que la velocidad con que aparenta transmitirse una onda en un cierto punto de la superficie del suelo es igual al cociente entre la velocidad superficial y el seno del ángulo de emergencia, tomados ambos en dicho punto. Donde el ángulo de emergencia es formado por la onda emergente con la superficie (ver fig. 3.25).

Sea un corte vertical del terreno y un frente de ondas  $GL$  llegando a la superficie en  $G$ . Considérese dos rayos infinitamente próximos llegando a dos geófonos  $G$  y  $G'$  separados una distancia  $\Delta x$ . Sean  $GA$  y  $G'B$  los tiempos de llegada.

La velocidad con que aparenta transmitirse los rayos  $G$  y  $G'$  será  $V_a = \Delta x / \Delta t$ ; consideremos adicionalmente que el frente de ondas se desplaza de  $L$  a  $G'$  con su velocidad superficial  $V_o$ , donde  $\Delta s / \Delta t = V_o$  y como  $\Delta s = \Delta x \sin \phi_o$  se obtiene la velocidad aparente  $V_a$ :

$$V_a = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\sin \phi_o \Delta t} = \frac{V_o}{\sin \phi_o} \quad \text{Ecuación 3.03}$$

Donde  $V_a > V_o$

La velocidad aparente en el punto  $A$ , será la tangente a la domocrónica  $AB$  en el punto

$A$ , ya que  $V_a = \lim \frac{\Delta x}{\Delta t}$ , cuando  $\Delta t \rightarrow 0$  teniendo finalmente que:  $V_a = \frac{dx}{dt}$

### 3.5.5.2 PRINCIPIO DE RECIPROCIDAD.

Este principio establece que el tiempo de propagación de una onda sísmica de un punto  $A$  a un punto  $B$ , es el mismo que el de un punto  $B$  hacia un punto  $A$ . Esto es una consecuencia directa del Principio de Fermat, o del recorrido de tiempo mínimo.

Sea la figura. 3.26 en donde se han considerado dos refractores. Por el principio de reciprocidad la prolongación de las domocronas de un mismo refractor generadas por puntos de disparo utilizados para mediciones conjugadas, por ejemplo domocrona  $H-I$  y  $K-J$ , deben interceptar el eje del tiempo en un mismo valor, es decir  $T_{1d} = T_{1a}$ .

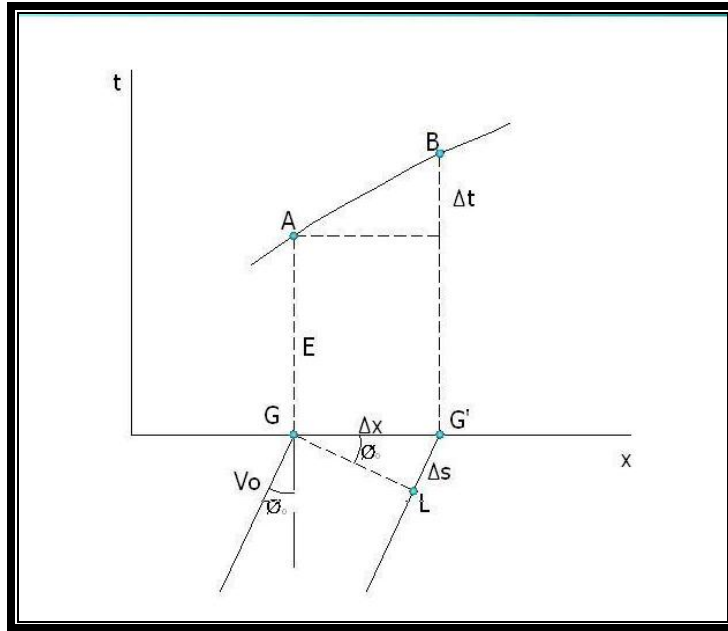


Figura 3.25 Ley de las velocidades aparentes.<sup>1</sup>

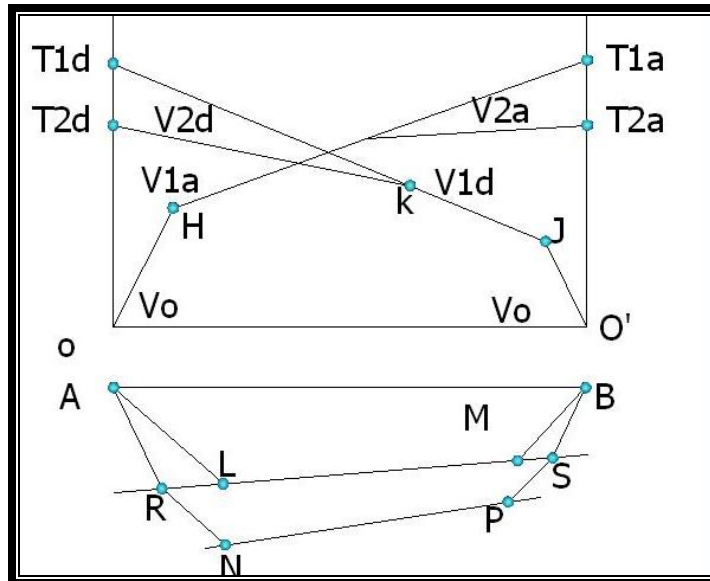


Figura 3.26 Principio de Reciprocidad.<sup>1</sup>

### 3.5.5.3 PRINCIPIO DEL INTERCEPTO EN EL ORIGEN.

Sea un refractor inclinado (ver figura 3.27) y supóngase que desde la superficie se efectúan dos disparos en el punto  $O$  y que se registran las ondas en dos puntos  $A$  y  $D$ ; el principio del tiempo de intercepto en el origen dice que si se prolongan las *domocronas* “ $a$ ” y “ $d$ ” hasta que cortan el eje de tiempo  $Ot$ , los tiempos de intercepto en el origen son iguales.

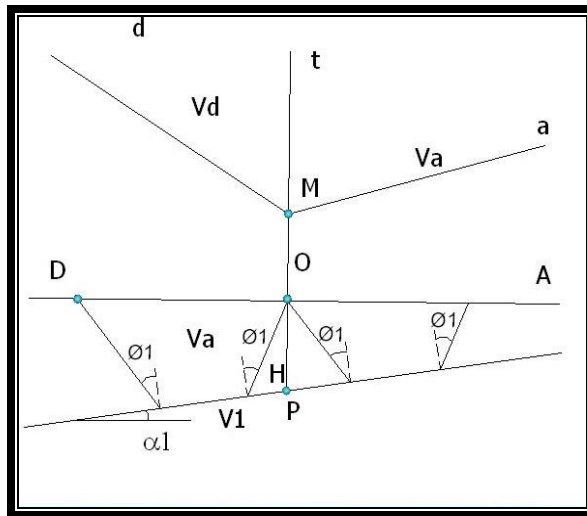


Figura 3.27 Tiempo de intercepto en el origen.<sup>1</sup>

### 3.5.5.4 PRINCIPIO DE PARALELISMO.

Este principio permite deducir ó identificar domocronas relacionadas con disparos intermedios de aquellas obtenidas de disparos en los extremos de la línea de inspección. Además, permite deducir domocronas relacionadas con disparos complementarios mucho mas alejado de los extremos de la línea de inspección.

Este principio funciona igualmente para interfases horizontales como para interfases inclinadas; en el caso de interfases cóncavas, por ejemplo hacia arriba para distancias

cortas las ondas viajan por la superficie de la interfase, pero para distancias largas viajan (más rápido) por dentro del refractor. (Siguiendo el Principio de Fermat).

Según la figura 3.28 la domocrona intermedia  $O_1HE'$  se puede deducir por simple paralelas de las dos domocronas complementarias  $ODE$  y  $O'FG$  a partir del punto de supuesto disparo  $O_1$ .

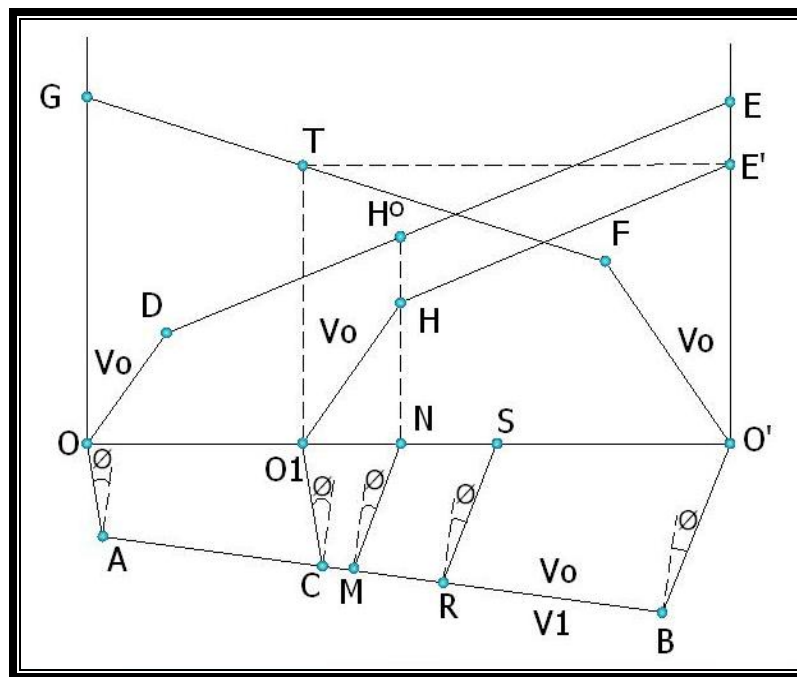


Figura 3.28 Aplicación del principio de paralelismo<sup>1</sup>

### 3.5.6 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

De las suposiciones generales y de los principios se derivan los métodos de análisis de las domocronas identificadas.

En general, los métodos de interpretación y cálculo en refracción sísmica se diferencian por las suposiciones que implican y los modelos de suelo que estudian, así como por sus



capacidades de aproximarse mejor a la topografía real de los refractores y al perfil de velocidades.

En base a de la suposición tomada para la determinación de la profundidad del refractor, los métodos de interpretación y cálculo se dividen en dos grupos:

- a. Métodos para la definición de refractores planos (horizontales o con una inclinación constante).
- b. Métodos para la definición de refractores no planos.

Los métodos usados para refractores planos incluyen el método tiempo-intercepto. Por otro lado, los métodos utilizados para definir refractores no planos son el método común recíproco y recíproco generalizado.

En el desarrollo de este trabajo de graduación se utilizará únicamente el método tiempo-intercepto.

#### **3.5.6.1 METODO TIEMPO-INTERCEPTO.**

Las ondas originadas una vez refractadas en los contactos de los medios, permiten determinar los tiempos de llegada de las primeras ondas que son detectadas en cada uno de los geófonos en la superficie. Estos tiempos se incrementan con la distancia de viaje y la profundidad de penetración de las ondas. De la curva (curva  $t-x$ ), el método utiliza la pendiente de las domocronas para calcular la velocidad de los refractores; los tiempos de intercepto de las domocronas con el eje de las ordenadas son utilizados para calcular las profundidades a las que se ubican dichos refractores. Este método es usado para modelos de un refractor horizontal o múltiples refractores horizontales.

Las velocidades de un modelo simple de dos estratos, con la curva t-x se muestran en la figura 3.29; usaremos esta figura como base para definir los principios básicos de interpretación del método tiempo intercepto.

La curva t-x consta de dos tramos o segmentos de recta (ver figura 3.29)

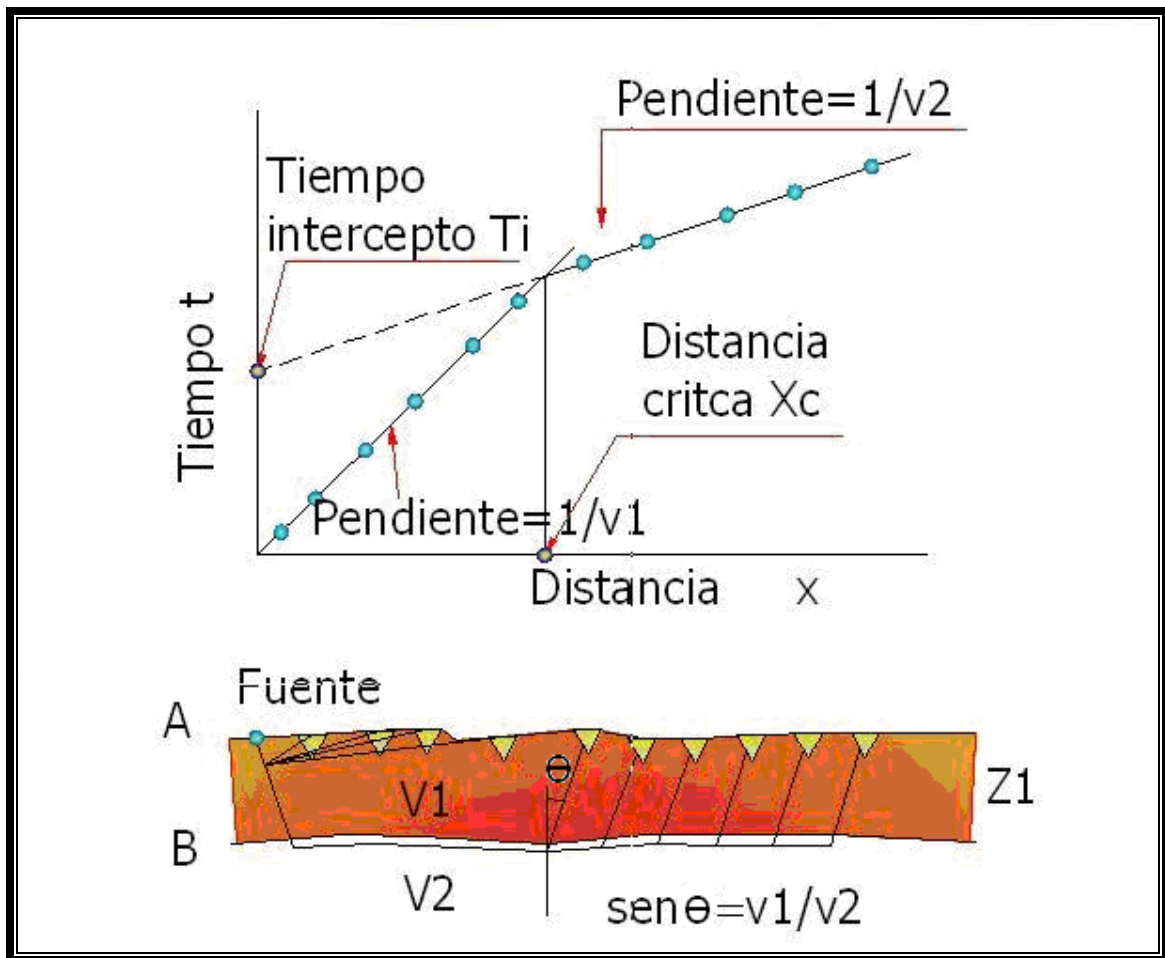


Figura 3.29 Caso Simple de Dos Capas Horizontales, y la Curva t-x.<sup>22</sup>

El primer tramo corresponde a la onda directa, y su ecuación es:

$$t_1 = x/v_1 \quad \text{Ecuación 3.01}$$

El cambio de la pendiente de la curva t-x, que ocurre en el punto llamado “distancia de cruce”, el cual marca el punto (un receptor sobre la superficie) en el que los tiempos de viaje de las ondas directas (que viaja a través de la capa o estrato superficial) y de las ondas refractadas (de la capa o estrato más profundo) son iguales. Más allá de ese punto, las ondas refractadas serán las primeras en ser detectadas.

Si  $V_1$  es la velocidad de las ondas directas a través del estrato superficial (estrato 1);  $V_2$ , la velocidad de las ondas refractadas en el estrato más profundo (estrato 2); y  $Z$  representa la profundidad en la que se ubica la interfase entre ambos estratos (espesor del estrato superficial), entonces la ecuación para el tiempo de viaje de la onda refractada  $T_2$  es:

$$T_2 = \frac{ac}{V_1} + \frac{cd}{V_2} + \frac{df}{V_1} \quad (a)$$

Luego también puede verse que:

$$ac = df = \frac{Z}{\cos \theta} \quad (b)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo crítico, que representa el ángulo al cual, una onda al llegar a la frontera del estrato es críticamente refractado a lo largo de esta. Sustituyendo la ecuación (b) en la ecuación (a) se tiene:

$$T_2 = \frac{2Z}{V_1 \cos \theta} + \frac{cd}{V_2} \quad (c)$$

donde :

$$\tan \theta = \frac{bc}{Z} = \frac{de}{Z} \quad \text{ó} \quad bc = de = Z \tan \theta \quad (d)$$

es de hacer notar, que:

$$cd = x - bc - dc = x - 2Z \tan \theta \quad (e)$$

Sustituyendo la ecuación (e) en la ecuación (c), obtenemos:

$$T_2 = \frac{2Z}{V_1 \cos \theta} + \frac{x - 2Z \tan \theta}{V_2} \Rightarrow T_2 = \frac{2ZV_2 + [xV_1 \cos \theta - 2ZV_1 \cos \theta \tan \theta]}{V_1 V_2 \cos \theta}$$

$$T_2 = \frac{2ZV_2 + xV_1 \cos \theta - 2ZV_1 \cos \theta \tan \theta}{V_1 V_2 \cos \theta} \Rightarrow \text{factorando con } 2Z \text{ y por identidades}$$

trigonométricas  $\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$  y disminuyendo términos

$$T_2 = 2Z \left[ \frac{(V_2 - V_1 \sin \theta)}{V_1 V_2 \cos \theta} \right] + \frac{x}{V_2} \quad (f)$$

Utilizando la ley de Snell:

$$\sin \theta = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{\sin \theta} \quad (g)$$

$$T_2 = 2ZV_1 \left[ \frac{\frac{V_1}{\sin \theta} - V_1 \sin \theta}{V_1 V_2 \cos \theta} \right] + \frac{x}{V_2} \Rightarrow T_2 = 2ZV_1 \left[ \frac{1 - \sin^2 \theta}{\frac{\sin \theta}{V_1 V_2 \cos \theta}} \right] + \frac{x}{V_2}$$

Utilizando la identidad trigonométrica  $1 - \sin^2 \theta = \cos^2 \theta$  se tiene:

$$T_2 = 2ZV_1 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{V_1 V_2 \sin \theta \cos \theta} \right] + \frac{x}{V_2} \Rightarrow T_2 = 2Z \left[ \frac{\cos \theta}{V_1} \right] + \frac{x}{V_2} \quad (h)$$

Cuando  $x=0$ ,  $T_2=T_i$  y es igual a:

$$T_i = 2Z \left[ \frac{\cos \theta}{V_1} \right] \quad (i)$$

Donde  $T_i$  es el llamado *tiempo de intercepto*. Además, trabajando la ecuación (f) y conociendo que para  $x=0$ ,  $T_2=T_i$

por trigonometría  $\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \quad \therefore \quad \sin \theta = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow \quad \cos \theta = \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2} \quad \therefore$

$$Z = \frac{T_i V_1}{2 \cos \theta} \Rightarrow Z = \frac{T_i V_1}{2 \left( \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2} \right)}$$

$$Z = \frac{T_i V_1 V_2}{2 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad \textbf{Ecuación 3.04}$$

Otra alternativa para la determinación de la profundidad de la interfase entre dos *estratos*, es por medio de la ecuación para la distancia de viaje.

Si partimos de la ecuación

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2Z \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2}}{V_1 V_2} \quad \textbf{Ecuación 3.05}$$

observamos que esta es la ecuación de una línea recta, pero con pendiente  $1/V_1$  y cuya ordenada en el origen se conoce como tiempo de intercepción ( $t_i$ ).

Si se igualan la ecuación 3.05 y la ecuación 3.01 se tiene:

$$\frac{Xc}{V_1} = \frac{Xc}{V_2} + \frac{2Z \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2}$$

Finalmente se llega a:

$$Z = \frac{X_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad \text{Ecuación 3.06}$$

Como se ve en la figura 3.29, la distancia o abscisa de la intersección de las dos rectas que se llama distancia de cruce o distancia crítica  $X_c$ . A distancias menores que  $X_c$ , la onda directa es la primera en llegar al receptor. A distancias mayores que  $X_c$ , las ondas refractadas en la interfase de separación entre dos estratos distintos llegan primero que las ondas directas. Por esta razón,  $X_c$  es denominada distancia crítica y que permitirá calcular la profundidad a que se encuentra la *interfase* de separación.

De este modo, la curva t-x de las primeras llegadas puede representar dos líneas o domocronas de pendiente constante y un punto común ( $X_c$ ). Del inverso de los valores de dichas pendientes se calcula  $V_1$  y  $V_2$  (ver figura 3.29). Dependiendo de la dureza del estrato, se puede tener una pendiente pronunciada relacionada a estratos suaves o una pendiente con tendencia a buscar la horizontal para estratos duros.

#### **ECUACIONES PARA EL CASO DE VARIOS ESTRATOS.**

En el caso de varios estratos planos, la geometría de refracción de las ondas en los estratos más profundos es un poco más compleja, pero se basa en los principios expuestos para el caso de dos estratos utilizando el tiempo de intercepto. Sus resultados se presentan a continuación:

$$Z_1 = \frac{(T_{i2})V_1}{2 \cos(\sin^{-1}V_1/V_2)} \quad \text{Ecuación 3.07}$$

$$Z_2 = \frac{\left[ T_{i3} - T_{i2} \frac{\cos(\sin^{-1}V_1/V_3)}{\cos(\sin^{-1}V_1/V_2)} \right] V_2}{2 \cos(\sin^{-1}V_2/V_3)} \quad \text{Ecuación 3.08}$$

$$Z_3 = \frac{\left[ T_{i4} - T_{i3} \frac{\cos(\sin^{-1}V_1/V_4)}{\cos(\sin^{-1}V_1/V_2)} - \frac{2Z_2 \cos(\sin^{-1}V_2/V_4)}{V_2} \right] V_3}{2 \cos(\sin^{-1}V_3/V_4)} \quad \text{Ecuación 3.09}$$

### ECUACIONES PARA EL CASO DE CAPAS INCLINADAS.

Considerando la existencia de una interfase o contacto inclinado, se utilizara el concepto de velocidades aparentes, y se explicara su efecto sobre los cálculos de la profundidad.

Las ecuaciones derivadas anteriormente (ecuaciones 3.04 y 3.06), requieren el conocimiento de las velocidades “verdaderas” de las capas. Si las fronteras entre las interfases no son paralelas (es decir, si hay capas inclinadas), una curva t-x dará solamente velocidades aparentes para las capas refractantes, y el uso de estas velocidades aparentes resultará en profundidades erróneas.

El caso de interfases inclinadas y su efecto sobre la curva t-x es ilustrado en la figura 3.30.

En la figura ilustra sobre el uso de disparos para mediciones conjugadas las cuales pueden ser aplicadas en inspecciones por refracción.

El disparo para mediciones conjugadas significa simplemente realizar un disparo en ambos extremos de la línea sísmica de modo que tiempos de llegada en cada detector o sensor se miden en ambas direcciones.

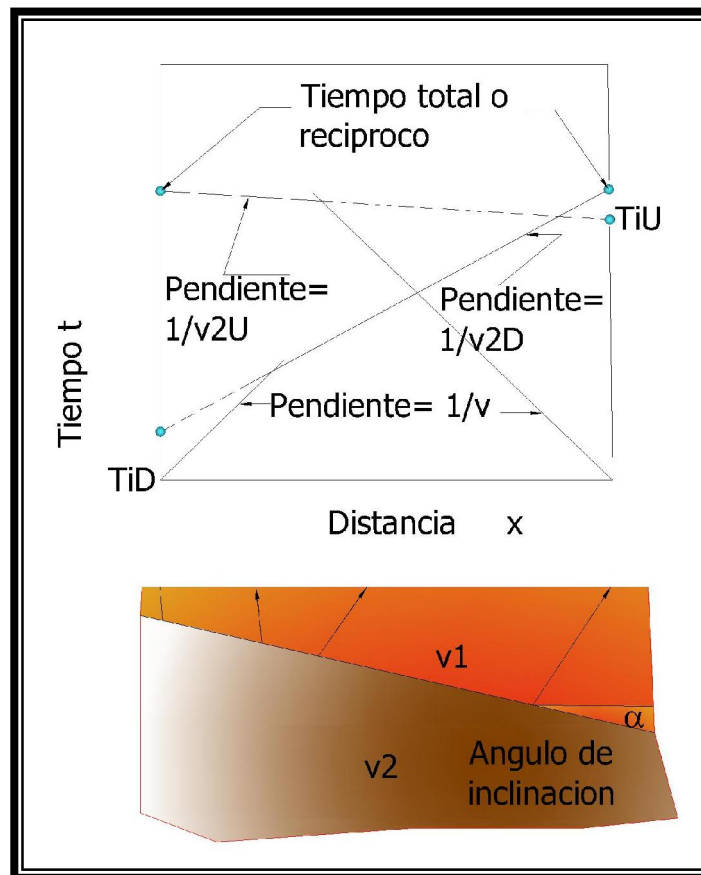


Figura 3.30 Ejemplo de Interfase inclinada y conceptos de mediciones conjugadas y velocidad aparente.<sup>22</sup>



De la figura 3.30 es evidente observar que la velocidad aparente de la capa refractante, determinada de la curva t-x, depende de cómo el disparo es aplicado al principio o al final de la línea de inspección, y que una profundidad determinada en base a un único disparo será válido solo en un punto a lo largo de la línea de inspección. A menos que el ángulo de inclinación de la interfase sea conocido, la medición conjugada es requerida para determinar el valor verdadero de  $V_2$ .

Si la velocidad aparente de la interfase, como la observada del disparo inicio de la línea de inspección (extremo izquierdo de la figura) es  $V_{2D}$ , de la ley de Snell:

$$V_{2D} = V_1 / \text{sen} (\theta + \alpha) \quad \textbf{Ecuación 3.10}$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de inclinación de la interfase relativa a la superficie y  $\theta$  es el ángulo crítico de incidencia. Similarmente, la velocidad aparente,  $V_{2U}$ , observada del disparo al final de la línea sísmica (extremo derecho de la figura) resulta:

$$V_{2U} = V_1 / \text{sen} (\theta - \alpha) \quad \textbf{Ecuación 3.11}$$

Se puede cambiar las dos relaciones para obtener:

$$\begin{aligned} \alpha + \theta &= \text{sen}^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2D}} \right) \\ \alpha - \theta &= \text{sen}^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2U}} \right) \end{aligned} \quad \textbf{Ecuación 3.12 y 3.13, respectivamente}$$

Del cual el ángulo de inclinación de la interfase puede ser determinado:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2D}} \right) - \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2U}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 3.14}$$

El valor verdadero de  $V_2$  no es el promedio aritmético de  $V_{2U}$  y  $V_{2D}$ , pero es utilizado el valor armónico multiplicado por el coseno del ángulo de inclinación de la interfase:

$$V_2 = \frac{2V_{2U}V_{2D}}{V_{2U} + V_{2D}} \cos \alpha . \quad \text{Ecuación 3.15}$$

### **3.5.7 LIMITACIONES Y POSIBLES CAUSAS DE ERROR DEL MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA.**

#### **3.5.7.1 TENDIDOS, TRASLAPES Y MEDICIÓN DE TIEMPOS DE ARRIBO.**

- Cuando no se realizan tendidos o arreglos de geófonos traslapados (ver apartado 3.4.3.2) en el estudio de terrenos muy extensos, las discontinuidades topográficas no son bien definidas y existe probabilidad de una mala interpretación.
- Como regla práctica, las longitudes de los tendidos de refracción deben ser mayores que el doble de la profundidad al refractor para registrar refracciones de ondas, de lo contrario solo se obtendrá el registro del tiempo de arribo de las ondas directas.

#### **3.5.7.2 SITIOS DE MEDICIÓN.**

- En entornos urbanos el Método está limitado por la cantidad y accesibilidad de zonas descubiertas o zonas verdes con suficiente extensión de 100 a 300 m, Debido a que las relaciones de velocidades entre diferentes capas y las

profundidades y espesores de estas, determinan la longitud del tendido de refracción que permitirá obtener información completa de cada capa. De tal manera que las extensiones de terrenos disponibles en el área de estudio limitan los alcances de la aplicación del método y por ende la profundidad de exploración.

- Una limitación importante de la generación de impacto con martillos es la accesibilidad del terreno, debido a que su uso en áreas con topografía quebrada es complicada.

#### **3.5.7.3 INTERPRETACIÓN.**

- Una limitación muy importante es la interpretación de un registro de refracción sísmica, ya que se requiere identificar en cada una de las trazas de arribo la energía común de todas las trazas. Por lo que si no se realiza una correcta diferenciación de tiempo, entre el momento de inicio y el momento en que el pulso de energía aparece en la traza. Esta diferencia de tiempo provocaría que los puntos en la domocronas no tengan una tendencia lineal.<sup>25</sup>
- Un cambio de pendiente de la curva T-x no significa necesariamente un cambio de refractor, sino que puede significar un cambio de pendiente del primer refractor.
- Cuando existe una capa demasiado delgada, a pesar de tener velocidades mayores no alcanza a producir primeros arribos por el hecho mismo de ser tan delgada.

- El Método de Interpretación Tiempo Intercepto es usado para modelos de un refractor plano o múltiples refractores planos.<sup>22</sup>
- Una causa de error es el ruido eléctrico generalmente 60 Hz (ciclos por segundo). Debido a que este genera ondas que son registradas y complican el trabajo de interpretación de los primeros arribos.

#### **3.5.7.4 CAPACIDAD DE LA FUENTE.**

- Una fuente tiene que tener la capacidad suficiente de generar ondas que permitan llegar hasta la interfase del estrato refractor, para que sean registradas tanto las ondas directas como las ondas refractadas. Una fuente que genera ondas débiles tiene limitantes para que las ondas que genera sean refractadas y registradas.

#### **3.5.7.5 CLIMA.**

- Los climas húmedos o lluviosos, afectan tanto al personal en el desarrollo del método como el equipo utilizado. La conexión de geófono y cable no es impermeable por lo que el impulso eléctrico puede regresar a tierra, además el impacto directo de las gotas de lluvia es registrado.
- Otro factor es el ruido del viento y la fuerza que este genere de tal forma que pueda mover cables de conexión y geófonos.

#### **3.5.7.6 ERRORES HUMANOS.**

- Inadecuada colocación de cables, distribución no uniforme de geófonos, revisión del estado del equipo, registro de señales inadecuadamente.

### **3.5.7.7 CONDICIONES GEOLÓGICAS.**

- Una limitación es la presencia de zonas o capas ciegas, donde puede estar un cambio o contraste suficiente (que denota otra interfase refractora que no fue detectada) entre la velocidad sísmica del material que ha quedado encima de la interfase refractora que si se detectó.
- Otra limitante es que una capa tiene que tener un espesor adecuado para que el sismógrafo pueda detectarlo y se puede establecer un cambio de pendiente en las domocrónicas.
- Si existe un estrato o capa que tiene una velocidad sísmica mas baja que la capa inmediata superior a esta (caso de inversión de velocidad), la capa con baja velocidad sísmica no puede ser detectada. Como resultado, el computo de la profundidad de las capas mas profundas son mucho mayores que las profundidades reales (aunque la condición geológica mas común es que la velocidad sísmica se incremente con la profundidad, hay situaciones en que la inversión de velocidad ocurre).<sup>24</sup>

### **3.6 INFORMACIÓN DE REFERENCIA NECESARIA PARA EL DESARROLLO DEL ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA.**

#### **3.6.1 VELOCIDADES DE ONDAS “P” Y “S” PARA ALGUNOS TIPOS DE MATERIALES.**

Las velocidades de ondas P (ver tabla 3.05) son generalmente mayores para:

1. Rocas densas que para rocas livianas o más ligeras.
2. Rocas antiguas que para rocas jóvenes.
3. Rocas ígneas que para rocas sedimentarias.
4. Rocas sólidas que en rocas con agrietamientos y fracturas.
5. Rocas sanas (no erosionadas) que en rocas erosionadas (intemperizadas).
6. Sedimentos consolidados que en sedimentos poco consolidados.
7. Sedimentos no consolidados en estado saturado que en Sedimentos no consolidados en estado seco.
8. Suelos húmedos que en suelos secos.

Además, la velocidad de propagación en los materiales geológicos (ver Tabla 3.06 y 3.07) varía de acuerdo con:

1. Grado de acidez de la roca.
2. Grado de saturación de cualquier fluido.
3. Consolidación, consistencia y compactación.
4. Cantidad de agua retenida en los poros.

5. Fracturamiento.
6. Alteración.
7. Densidad.
8. Vejez.
9. Profundidad.

### **3.6.2 RELACIONES ENTRE PARAMETROS DINAMICOS DEL SUELO Y LA VELOCIDAD DE ONDAS “P” Y “S”.**

La velocidad de propagación de las ondas P es casi dos veces mayor que la velocidad de las ondas S. La velocidad de propagación de las ondas sísmicas es distinta, dependiendo del tipo de suelo, siendo mayor la velocidad de las ondas P. Entre mayor es la rigidez del medio, los valores de velocidad para ondas P y S tienden a ser muy cercanos

En un medio homogéneo, la velocidad de las ondas elásticas depende de la densidad de masa del suelo ( $\rho$ ), y de los parámetros elásticos: módulo de elasticidad (E), cociente de Poisson ( $\nu$ ) y módulo de rigidez (G) (ver Tabla 3.08).

Las ondas superficiales son en extremo mucho más lentas y de forma compleja que las ondas de cuerpo. Su tiempo de propagación es del 90% a 95% del valor de la velocidad de ondas de corte “Vs”, son de baja frecuencia, y se dividen en dos tipos: las Rayleigh y las Love.

Las velocidades de propagación de las ondas de cuerpo están reguladas por los módulos elásticos “K” y “G” que representan las medidas cuantitativas de la capacidad de los materiales geológicos para resistir el cambio de volumen y forma cuando se someten a cambios de esfuerzo. Las velocidades de las ondas son (en m/s):

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4.G}{3}}{\rho}}$$

**Ecuación 3.16**

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

**Ecuación 3.17**

$$V_p = \left[ \frac{E}{\rho} \right]^{0.5}$$

**Ecuación 3.18**

La relación que existe entre los parámetros de deformabilidad “E”, el Índice de Poisson “ν” y la velocidad de ondas P y S son los siguientes:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho.(1+\nu).(1-2\nu)}}$$

**Ecuación 3.19**

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho.(1+\nu)}}$$

**Ecuación 3.20**

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2.(1-\nu)}{1-2\nu}}$$

**Ecuación 3.21**

Las constantes de Lamé (λ, μ) y la densidad del material (ρ) están relacionadas a las velocidades de propagación por:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

**Ecuación 3.22**

Entonces, la velocidad de onda a través de la roca o concreto es (en m/s) :

$$V_p = \sqrt{\frac{\left( \frac{K}{\rho} \right)}{1 + \left( 2 \cdot \frac{K}{G} \right) (1 + \nu)}}$$

**Ecuación 3.23**



Las ecuaciones que relacionan la velocidad de onda P y S a cada uno de los parámetros dinámicos, son las siguientes (Ver *Tabla 3.09*):

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad \text{Ecuación 3.24}$$

$$E = \rho \cdot \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

$$K = \rho \cdot \left( V_p^2 - \frac{4V_s^2}{3} \right) \text{ (N/m}^2\text{)} \quad \text{Ecuación 3.26}$$

$$\lambda = \rho(V_p^3 - 2V_s^3) \quad \text{Ecuación 3.27}$$

### 3.6.3 COEFICIENTE DE POISSON.

La relación de Poisson ( $\nu$ ) es una medida de la contracción lateral del material. En el caso de materiales elásticos varía entre 0 y 0,5. Como los líquidos no oponen resistencia a esfuerzo cortante,  $\mu = 0$ , entonces  $\nu = 1/2$ .

Para suelos, Salem (2000) encontró que: (1) valores de  $\nu$  inferiores a 0.5 en suelos superficiales pueden indicar presencia de humus, sedimentos o suelos arcillosos;

(2) valores alrededor de 0,1 en superficie pueden indicar saturación de aire o arenas de cuarzo puro; (3) el cociente de Poisson aumenta con la profundidad, lo que puede deberse a que los suelos y sedimentos cerca de la superficie son más jóvenes y más compresibles que los suelos a mayores profundidades, menos compresibles y más plásticos.

MATERIALES	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)
Acero	6000
Agua (Dependiendo de la Temperatura y Contenido de Sal)	1430-1680
Agua de Mar	1460-1530
Agua Fresca Superficial	1430-1490
Aire	330
Arcilla Arenosa Semi-Consolidada (Suelo arcilloso)	381-655
Arcilla Saturada	910-2750
Arcilla, Arenisca Arcillosa	1798
Arcilla, Densa y Húmeda. Dependiendo de la Profundidad	914-1798
Arena	1402-2560
Arena Arcillosa	975-1158
Arena Arcillosa Cementada	1158-1280
Arena Cementada	853-975
Arena Húmeda o Saturada (incluyendo a la movediza)	610-1830
Arena Seca	450-900
Arenas Compactas	1500-5400
Arenas y Gravas Sueltas	400-900
Arenas y Gravas Sueltas Saturadas	1500-1800
Areniscas y Lutitas	1830-4500
Basalto Inalterado	2600-4300
Caliza	2134-6100
Carbón	1500
Cieno	1400-1800
Dolomita y Caliza	4300-6700
Escombros (Ripio) o Grava	600-793
Esquisto, Arcilla Esquistosa (Shale)	800-4270
Granito	4575-5800
Granito Inalterado	4800-6700
Ígnea Alterada y Roca Metamórfica	450-3700
Marga Humedecida	300-750

Tabla 3.05 Tabla Resumen sobre Valores Típicos o Representativos de Campo de Velocidades de Ondas “P” para Varios Materiales.

(Fuente: Tablas Varias. Ver Anexo I.)

MATERIALES	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)
Margas	2500-4500
Material Superficial (Capa de Alteración de Suelos y Rocas)	305-610
Pizarras	2500-4500
Roca alterada (Intemperizada)	1500
Roca Metamórfica	2400-7020
Roca Sedimentaria Alterada	600-3000
Rocas Ígneas	4500-7500
Rocas Sedimentarias	3500-5500
Sal	4000-5190
Sedimentos no Consolidados	300-2500
Suelo Superficial Húmedo, Lodoso o Cienoso	305-396
Suelo Superficial Ligero y Seco	183-274
Tierra Suelta	250-400
Yeso o Tiza	1830-3970

Tabla 3.05 (Continuación) Tabla Resumen sobre Valores Típicos o Representativos de Campo de Velocidades de Ondas “P” para Varios Materiales.

(Fuente: Documentos Varios. Ver Anexo I).

CLASIFICACION DEL MATERIAL	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)
Suelo Blando	< 180
Suelo Rígido	180-360
Suelo muy Denso; Roca Blanda	360-760
Roca	760-1500
Roca Dura	>1500

Tabla 3.06 Clasificación de los materiales, de acuerdo a la velocidad de ondas S que presentan.<sup>1</sup>

MATERIAL	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)
Agua	0
Arena Movediza	0
Arenas Compactas	800 – 2000
Areniscas	2150
Basalto	3200
Calizas	1350
Carbón	900
Cieno	50 – 300
Depósitos de Arcilla	900
Granito	3000
Gravas Saturadas (Limpia)	300
Gravas Saturadas (Sucia)	600
Gravas y Arenas Densas	150 – 200
Limos	2000 – 3000
Roca Alterada (Intemperizada)	600-900
Rocas Ígneas	3500 – 4000
Rocas Metamórficas	2500 – 3500
Rocas Sedimentarias	1500 – 3000
Sedimentos no Consolidados	100 – 500

Tabla 3.07 Tabla Resumen sobre Valores Típicos o Representativos de Campo de Velocidades de Ondas “S” para Varios Materiales.

(Fuente: Documentos Varios. Ver Anexo I)

Nombre	Símbolo	Definición
Módulo de Young ó Módulo de Elasticidad	E	$\frac{\text{Esfuerzo Longitudinal}}{\text{Deformación Longitudinal}}$
Módulo de Corte ó Módulo de Rigidez	G ó $\mu$	$\frac{\text{Esfuerzo Cortante}}{\text{Deformación Cortante}}$
Razón de Poisson	$\nu$	$\frac{\text{Deformación Longitudinal}}{\text{Deformación Transversal}}$
Módulo Bulk	K	$\frac{\text{Presión Hidrostática}}{\text{Deformación Volumétrica}}$

Tabla 3.08 Definición de Constantes Elásticas.<sup>13</sup>

MATERIAL	$\rho$ (T/m <sup>3</sup> )
Arena Seca	1.6-2.0
Agua Fresca Superficial	1.0
Arcilla	1.3-1.8
Arenisca	1.9-2.7
Basalto Inalterado	2.2-3.0
Dolomita y Caliza	2.5-3.0
Granito Inalterado	2.6-3.1

Tabla 3.09 Valores Típicos o Representativos de Campo de  $\rho$  (densidad) para Varios Materiales.<sup>25</sup>

El coeficiente de Poisson puede ser un indicativo de anisotropía en depósitos sedimentarios. Así, por ejemplo, Pickering (1970) en Salem (2000), demostró teóricamente que el rango  $-1,0 < \nu < 0,5$  corresponde a suelos anisotrópicos. Por su parte Salem (2000) encontró que los valores negativos de  $\sigma$  en suelos pueden indicar anisotropía. (Ver Tablas 3.10, Figuras 3.31 y 3.32)

TIPO DE MATERIAL	RELACION DE POISSON, $\nu$
Arcilla	0.40-0.5
Arcilla Blanda	0.15-0.25
Arcilla Media	0.2-0.5
Arena	0.30-0.40
Arena Densa	0.3-0.45
Arena Limosa	0.2-0.4
Arena Media	0.25-0.4
Arena Seca	0.3-0.35
Arena Suelta	0.2-0.4
Materiales en la Superficie con Saturación de Aire o Arenas de Cuarzo Puro	0.1
Roca	0.15-0.25
Rocas muy Blandas.	0.45
Rocas muy Duras	0 - 0.05
Sedimentos no Consolidados y no Saturados.	0.31
Suelos Anisotrópicos	-1.0 - 0.5
Suelos Superficiales con Presencia de Humus, Sedimentos o Suelos Arcillosos	< 0.5

Tabla 3.10 Valores representativos de la relación de Poisson ( $\nu$ ). Nótese que los esfuerzos normales horizontales dependen de la relación de Poisson del medio. Sin embargo para el esfuerzo normal vertical es independiente de la relación de Poisson. (Fuente: Documentos Varios. Ver Anexo II).

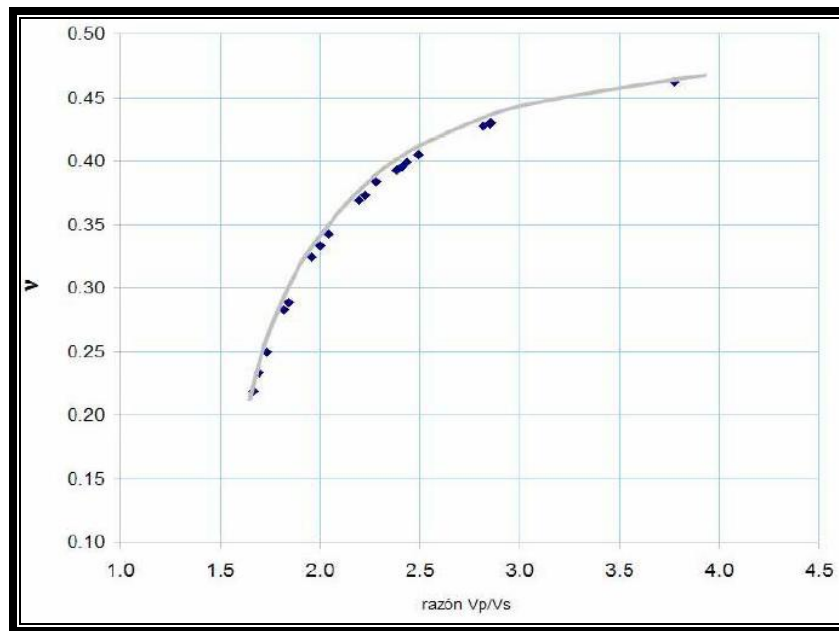


Fig. 3.31 Relación entre la razón “Vp/Vs” y la Relación de Poisson para Tobas.<sup>26</sup>

En la figura 3.31 se muestra la relación entre la “Vp/Vs” y el ángulo de fricción interna “ $\phi$ ” para suelos del tipo “ML” (limo de baja compresibilidad) del valle de Querétaro, México. Se interpreta que cuando la magnitud de la onda “Vs” está más cerca de la “Vp” el material es más rígido; por tanto, el ángulo de reposo o de fricción interna es mayor.

#### 3.6.4 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL TERRENO.

En este sentido, se emplea con gran frecuencia el Índice Q de Barton. El índice Q o índice de Barton, fue desarrollado en Noruega (1974) por Barton, Lien y Lunde, del NGI (Instituto Geotécnico Noruego). Su desarrollo se basó en el análisis de cientos de túneles construidos principalmente en Escandinavia. La clasificación geomecánica de Barton

<sup>26</sup> Álvarez Manilla A.A., (2003): “Evaluación Indirecta de los Módulos Elásticos de Rigidez in Situ y la Relación entre Vp/Vs y el Angulo de Fricción Interna”, Instituto Mexicano de Transporte, México.

asigna a cada terreno un valor numérico, tanto mayor cuanto mejor es la calidad geotécnica de la roca. Su variación oscila entre 0.001 para terrenos muy malos y 1000 para terrenos muy buenos.

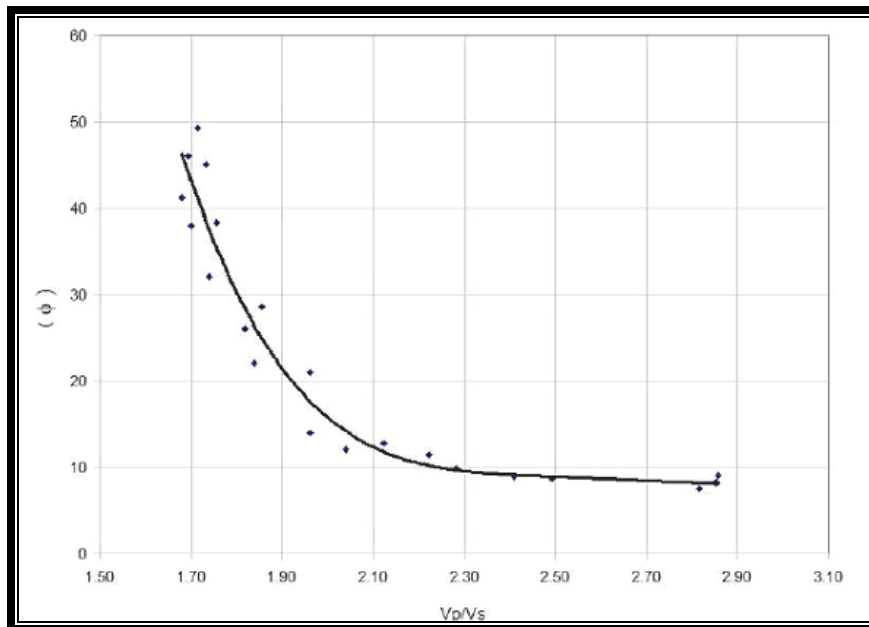


Figura 3.32 Relación entre la Razón “Vp/Vs” y el Angulo de Fricción Interna, Suelos “MH” y Tobas.<sup>26</sup>

El valor de Q se puede obtener a través de la siguiente expresión exponencial, debida a Barton (1991), a partir del valor de la velocidad de las ondas P:

$$Q = 10^{[(V_p - 3500)/1000]} \quad \text{Ecuación 3.28}$$

Donde:

Q = Índice de Barton.

Vp = Velocidad de las Ondas P, en m/s

Para granitos y neises de buena calidad, puede aplicarse una expresión que presenta mejor factor de correlación, debida también a Barton (1991):

$$Q = \frac{(V_p - 3600)}{50} \quad \text{Ecuación 3.29}$$

donde  $V_p$  se introduce en m/s.

### 3.6.5 OTROS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

La relación entre la velocidad de las Ondas P y la densidad de los terrenos que atraviesa, ha sido investigada por numerosos autores. Según Gardner (1974), para rocas sedimentarias se verifica la siguiente relación empírica:

$$\rho = a \times V_p^{0.25} \quad \text{Ecuación 3.30}$$

Donde:

$a$  = constante igual a 1670

$\rho$  = densidad de la roca ( $\text{Kg/m}^3$ )

$V_p$  = velocidad de propagación de las ondas P, en ( $\text{Km/s}$ )

La velocidad de las ondas P, permite determinar con bastante precisión el grado de fracturación de la roca. De acuerdo con Helfrich (1971), existe una relación entre la velocidad de las ondas P y el índice de fracturación RQD (Rock Quality Designation), válida para rocas ígneas (ver Tabla 3.11):

NIVEL DE FACTURACIÓN	$V_p$ (m/s)	RQD
Roca sin facturación	>4500	>95%
Roca con pocas fracturas	4000-4500	95-75%
Roca fracturada en grado medio	3500-4000	75-50%
Roca con numerosas fracturas	3000-3500	50-25%
Roca fuertemente fracturada	<3000	<25%

Tabla 3.11. Relación en la Velocidad de Ondas P y el Índice de Fracturación RQD.<sup>2</sup>



No obstante, para el RQD existe una expresión más general, debida a Merkler (1970):

$$RQD = 100 \times \left( \frac{V_p}{V_{p\_laboratorio}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 3.31}$$

Donde:

$V_p$  = Velocidad de las Ondas P medidas mediante geofísica de campo

$V_{p\_laboratorio}$  = velocidad de las ondas P medidas mediante ensayos de laboratorio en testigos de sondeo.

### 3.6.6 EXCAVABILIDAD-RIPABILIDAD

Bajo el término de ripabilidad nos referimos a un criterio cualitativo que mide la aptitud de un macizo rocoso para ser quebrantado por medio de un ripper arrastrado por un bulldozer.

Lógicamente, la eficacia del ripado dependerá de la naturaleza de la roca sana y de la distribución de sus discontinuidades.

Son varios los criterios que se han venido utilizando para juzgar a priori la ripabilidad de un terreno. El más extendido consiste en determinar la velocidad sísmica de propagación de las ondas de compresión (Ondas P) a través del macizo rocoso, mediante una prospección geofísica de sísmica de refracción.

La compañía Caterpillar regularmente publica tablas de ripabilidad para sus distintos modelos de tractores. Las posibilidades de ripado se definen, para diversos tipos de rocas, por medio de su velocidad sísmica  $V_p$ . Para cada roca se definen los márgenes de

velocidad sísmica para los que la roca es ripable o no ripable. De acuerdo al fabricante de bulldozers Caterpillar, para un modelo D-9, la facilidad de ripado se determinaría de acuerdo al siguiente criterio, en función de  $V_p$ , velocidad de las ondas sísmicas primarias (Ver Tabla 3.12):

<b><math>V_p</math> (m/s)</b>	<b>CALIDAD DE MATERIAL</b>
Menor a 600	Materiales Suelos
600-1300	Ripado Fácil
1300-1700	Ripado Normal
1700-1850	Ripado Duro
Mayores a 1850	No son Ripable (Voladura).

Tabla 3.12 Márgenes de Velocidad Sísmica para la Definición de la Ripabilidad en Rocas.<sup>2</sup>

### 3.6.7 RELACIONES ENTRE EL VALOR DE “N” DEL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR Y LAS VELOCIDADES DE ONDAS “P” Y “S”.

$$V_p = 156 \times N^{0.38} \quad \text{Ecuación 3.32}$$

$$V_s = 81 \times N^{0.36} \quad \text{Ecuación 3.33}$$

Donde:

$V_p$  = Velocidades de las ondas P.

$V_s$  = Velocidades de las ondas S.

N = Numero de golpes del ensayo SPT.

Esta fórmulas fueron obtenidas por el ingeniero José Antonio González en la realización del documento “Valutazione Della pericolosità sismica nelle aree del distretto Sanitario

A3 (San Salvador) e del distretto 7 (Apopa)” en los apartados de “Caracterstiche dinamiche dei terreni nella aree di San Salvador e Apopa ricavate locale ed elaborazione delle carte di microzonazione sismica”, promovido por la República Italiana.<sup>8</sup>

### 3.6.8 RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE ONDAS “S” Y EL VALOR DE “N” DEL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR, SEGÚN LA NORMA JAPONESA.

Para suelos cohesivos, dicha velocidad se calcula como:

$$V_s = 100 \times N_i^{1/3} \quad \text{para } 1 \leq N \leq 25 \quad \text{Ecuación 3.34}$$

Para suelos arenosos se calcula como:

$$V_s = 80 \times N_i^{1/3} \quad \text{para } 1 \leq N \leq 50 \quad \text{Ecuación 3.35}$$

Donde “Ni” es el valor “N” del Ensayo de Penetración Estándar para el estrato i-esimo.

El sustrato rocoso se supone como un estrato de suelo que tiene un valor N mayor que 25 para estratos de suelo cohesivos, mayor que 50 para estratos de suelos arenosos; o bien que tiene una velocidad de onda de cizalla mayor que 300 m/s.

### 3.6.9 RECOMENDACIONES EN ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA.

La clasificación de los materiales (ver Tabla 3.13) esta basada en las condiciones geológicas locales por medio de:

1. La descripción física de los materiales sub-superficiales.

2. Estimaciones de la velocidad de las ondas sísmicas de cizalla medias obtenidas a partir de correlaciones con ensayos de penetración SPT y teniendo en cuenta el valor de  $C_u$  (resistencia al corte sin drenaje).
3. Medidas directas de la velocidad sísmica de las ondas S en los treinta primeros metros. Esta profundidad de interés corresponde a aquella en que las resonancias con el depósito de suelo mayores que 0.1 s.

TIPOLOGIA DEL MATERIAL	DESCRIPCION	$V_s$ EN LOS PRIMEROS 30 M SUPERIORES (m/s)
A	Roca Compacta	$V_s > 1500$
B	Roca	$760 < V_s \leq 1500$
C	Suelo muy denso y roca blanda	$360 < V_s \leq 760$
D	Suelo rígido $15 \leq N_{spt} \leq 50$ o $50 \text{ kPa} \leq C_u \leq 100 \text{ kPa}$	$180 \leq V_s \leq 730$
E	Perfil con mas de 3 m de arcilla blanda con $IP > 20$ , $\omega \geq 40\%$ y $C_u < 25 \text{ kPa}$	$V_s < 180$
F	1. Suelos susceptibles de rotura o colapso bajo carga sísmica tales como suelos licuefractables, arcillas sensitivas o suelos débilmente cementados.	
	2. Turba/arcillas orgánicas de potencia mayor a 3 m.	
	3. Arcillas de plasticidad muy alta con una potencia mayor a 3 m y un $IP > 75$	
	4. Arcillas de rigidez blanda a media de potencia > 36 m	

A: Presenta baja susceptibilidad a la amplificación

E: Representa un depósito de suelo blando y profundo con potencial para amplificar el movimiento y provocar la rotura del mismo

Tabla 3.13 Clasificación del suelo NHERP.<sup>2</sup>

### 3.6.10 RELACIONES ENTRE LA VELOCIDAD DE ONDAS “S” Y EL VALOR DE “N” DEL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR, SEGÚN LA NORMA ESPAÑOLA.

TIPO DE MATERIAL Y EDAD	CORRELACIÓN
Arena Holocena	$V_S = 87.8 \times N^{0.292}$
Grava Holocena	$V_S = 75.4 \times N^{0.351}$
Deposito de Edad Pleistocena	$V_S = 138 \times N^{0.246}$

Tabla 3.14 Correlaciones Empíricas entre el Valor “N” del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y la Velocidad de las Ondas Sísmicas de Corte (m/s) para Diferentes Tipos de Suelo y Edades Geológicas.<sup>2</sup>

TIPO DE SUELO	DESCRIPCION	Vs	COEFICIENTE DEL TERRENO*
I	Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso	>750	1.0
II	Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros	750-400	1.3
III	Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme	400-200	1.6
IV	Suelo granular suelto o suelo cohesivo blando.	<200	2.0

Tabla 3.15 Clasificación de Suelos en la Normativa Española.<sup>2</sup>

### 3.6.11 ENSAYO SPT (ESTÁNDAR PENETRATION TEST).

Este ensayo permite clasificar y estimar la capacidad de carga de un suelo. Esta regido por la Norma ASTM D 1586, que describe el procedimiento general para hincar una cuchara muestreadora con el fin de obtener una muestra representativa del suelo y una medida de la resistencia del suelo a la penetración de la misma.

El procedimiento para llevar a cabo el ensayo es el siguiente: la cuchara muestreadora se enrosca en las barras de perforación, que a su vez van enroscadas a un yunque que sirve de guía para la caída del peso del martillo. El peso del martillo es de 140 lb, y es sucesivamente levantado y dejado caer. Los golpes que tarda en perforar la cuchara muestreadora los tres intervalos sucesivos de 15 cm son contados y la sumatoria de los dos últimos intervalos será el valor de N, que es el que nos da la capacidad de carga del suelo (ver Tablas 3.16, 3.17 y 3.18).

CONSISTENCIA	NÚMERO DE GOLPES “N”	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (qu). Kg/cm <sup>2</sup>
Muy Blanda	Menor que 2	Menor que 0.25
Blanda	2-5	0.25-0.50
Media	5-10	0.5-1.00
Firme	10-20	1.00-2.00
Muy Firme	20-30	2.00-4.00
Dura	Mayor que 30	Mayor que 4.00

Tabla 3.16 Consistencia de Arcillas y Correlación Aproximada con el Número de Penetración Estándar “N”.<sup>27</sup>

SUELOS COHESIVOS		SUELOS FRICCIONANTES	
CONSISTENCIA	N	COMPACIDAD	N
Muy blanda	0-1	Muy suelta	0-4
Blanda	2-4	Suelta	5-10
Media	4-8	Semi-suelto	11-20
Firme	9-15	Semi-compacto	21-30
Dura	16-30	Compacto	31-50
Muy Dura	>30	Muy Compacto	>50

Tabla 3.17 Consistencia de Suelos Arcillosos y Compacidad de Suelos Friccionantes y su Correlación Aproximada con el Número de Penetración Estándar “N”.<sup>27</sup>

<sup>27</sup> Braja M. Das (2001). “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”. California State University. USA.

SUELOS FRICCIONANTES		SUELOS COHESIVOS	
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ( $\Phi$ )	N	Qu Kg /cm <sup>2</sup>	N
29	5-10*	0.6-1.2	5-10*
30	11-15	1.2-1.9	10-15
31	16-20	1.9-2.5	15-20
32	21-25	2.5-3.1	21-25
33	26-30	3.1-3.7	25-30

Nota: Bajo circunstancias inferiores a las señaladas será necesario considerarse la posibilidad de “falla local” con los siguientes valores:  $\Phi^* = \text{Arc. Tg } (2/3 \text{ tg } \Phi)$ ;  $c^* = 2/3 c$

Tabla 3.18 Correlación Directa entre el Número de Golpes, la Compacidad Relativa y el Angulo de Fricción Interna del Material.<sup>27</sup>

### 3.6.12 MÉTODO DE SIMPLIFICACIÓN DE SPT

Debido a que el ensayo SPT nos da una estratigrafía del terreno muy detallada que hace difícil y complejo el análisis de propagación de las ondas, y a que las características entre algunos tipos de suelo no varían, se propone utilizar el método de simplificación Kobayashi – Obayashi.

Los datos que se obtienen de una manera directa con la prueba SPT son tipo de suelo y numero de golpes N. Partiendo de estas dos variables podremos entrar al proceso de simplificación. Si simplificamos según el *tipo de suelo* el criterio que va a definir la separación de los estratos será un factor de tipo de suelo (FTS), que viene dado por la condición granulométrica del suelo. Existirá un límite entre dos tipos de suelo cuando la diferencia entre sus FTS sea mayor a 2/3 que es el valor límite. Si entre dos tipos de suelo no sucede esto entonces será tomado como un solo tipo de suelo. En la figura 3.32 se muestran los FTS por los que se registró esta simplificación.

En la columna 1 y 2 aparecen los tipos de suelo considerados con su respectiva clasificación; en la columna 3 y 6 se presenta, para cada tipo de suelo, el símbolo de

entrada y salida; en la columna 4 y 5, se muestran los diferentes tipos de factor de tipo de suelo, donde los valores de la columna 4 indican los valores representativos de cada tipo de suelo. En la columna 5, se muestran los límites de los tipos de suelo que resultan de la simplificación.










1	2	3	4	5	6
TIPOS DE SUELO	SUELO SEGUN CLASIFICACION CASA GRANDE CONTENIDO EN CADA TIPO DE SUELO	SIMBOLO DE ENTRADA EN EL PROGRAMA CORRESPON- DIENTE A C/ TIPO DE SUELO	FACTOR DE TIPO DE SUELO (FTS)		SIMBOLO DE SALIDA EN EL PROGRAMA GRUPO DE SUELOS
			VALOR REPRE- SENT. DEL GRU- PO DATO DE ENT	VALORES LI- MITES DE CA- DA GRUPO.	
				1000	
ARENA	 GW, GP, GM, GC SP, SW	SS	1.000		SS
ARENA LIMOSA	 SM	LS	1.000		
ARENA ARCILLOSA	 SC	CS	0.667	0.833	
LIMO ARENOSO	 ML	SL	0.667		SL
LIMO	 ML'	LL	0.667		
LIMO ARCILLOSO	 ML', MH	CL	0.333	0.500	
ARCILLA ARENOSA	 CL	SC	0.333		SC
ARCILLA LIMOSA	 CL, CH	LC	0.333		
ARCILLA Y SUELO ORGANICO	 OL, OH, ML- OL, CL-OL, SM-OL, PI	CC	0.000	0.166	
				0.000	CC

Figura 3.33. Tabla de Simplificación, de acuerdo al Tipo de suelo.<sup>9</sup>

Como se puede ver en la columna 6, resultan 4 tipos de suelo bien diferenciados entre si, y cada uno representa una serie de tipos de suelos con características comunes, por ejemplo si tomamos el símbolo SL, este significara que a este grupo le corresponderá un conjunto de suelos donde predominara en la combinación de arena arcillosa, limoso arenoso y limo.

La simplificación de acuerdo con el parámetro N consiste en colocar un límite entre dos estratos donde exista un cambio significativo de valores de N. El procedimiento consiste en encontrar la diferencia del valor N entre cada valor consecutivo. A este valor



le llamaremos Delta N, luego calcularemos la media aritmética de Delta N. Para esto es necesario excluir valores que ocasionan dispersión, el numero a excluir será el numero de registros multiplicado por un décimo. El numero de registros menos el valor de datos excluidos la llamaremos F. A continuación calculamos la media aritmética de los valores de Delta N, que es la sumatoria de los Delta N, que es la sumatoria de los Delta N entre los valores de F. Además calculamos la desviación estándar por medio de la siguiente formula:

$$\overline{\Delta N} = \frac{\Sigma(\Delta N)}{F} \quad \text{Ecuación 3.36}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\Sigma \Delta N)^2}{F} - \frac{(\overline{\Sigma \Delta N})^2}{F}} \quad \text{Ecuación 3.37}$$

Donde:

$\Delta N$  : Diferencia entre los valores de N.

F: Numero de valores de N a considerar.

$\overline{\Delta N}$  : Media aritmética.

$\sigma$  : Desviación estándar

Con estos parámetros estadísticos se calcula el valor que representa el cambio significativo de N con la siguiente formula:

$$\Delta N = \overline{\Delta N} + \sigma C \quad \text{Ecuación 3.38}$$

Donde C es un valor opcional, y depende del grado de simplificación que se desea obtener.

Así por ejemplo, se puede tomar un valor de  $C = 2$ .

# CAPITULO IV

#### **4.1 INTRODUCCIÓN.**

El presente capítulo describe el procedimiento utilizado para la realización de un ensayo de refracción sísmica en las instalaciones de la Universidad de El Salvador, que se realizó en el parqueo norte de la facultad de Ingeniería y Arquitectura, gracias a la colaboración del Ing. José Antonio González y la empresa CONTECSA SA DE CV, los pasos que se describen son generales para que puedan ser utilizados en otras investigaciones geotécnicas, al mismo tiempo se realizó un estudio de penetración estándar por la empresa F.C. S.A.de C.V., para corroborar los resultados de la prueba de refracción.

También se detalla una recopilación de resultados de ensayos sísmicos proporcionados generosamente por diferentes empresas (privada), y otros extraídos de trabajos de graduación, realizados en diferente tiempo y puntos de San Salvador con diferente objetivo (estratigrafía de la zona y facilidad de excavabilidad de materiales, evaluación de capacidad de carga, ubicación de puntos en donde se realizaran los sondeos mecánicos, evaluación de características mecánicas de resistencia y evaluación de zona, análisis de propiedades dinámicas, diseño de carreteras, etc.), estos resultados se han tabulado y resumido para establecer un rango de velocidades para el área de San Salvador.

## **4.2. ESTUDIO DE REFRACCION SISMICA EN LAS INSTALACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

### **4.2.1 GENERALIDADES.**

#### **4.2.1.1 INTRODUCCION**

Las investigaciones con fines geotécnicos realizan dos tipos de ensayos, los cuales son realizados de manera consecutiva y complementaria: Ensayos de Campo y Ensayos de Laboratorio; la finalidad de ambos es la obtención de información acerca de parámetros del suelo.

Los ensayos de campo se dividen, de acuerdo a la obtención de muestra de suelo, en directos e indirectos. Dentro de éstos últimos están ubicados los métodos geofísicos utilizados para la deducción de la estructura geológica superficial de los suelos por medio de la medición de fenómenos físicos.

Uno de los fenómenos más importantes es la velocidad de propagación de ondas y los métodos utilizados para la determinación de dicho parámetro se conocen como métodos sísmicos, siendo los más utilizados: Método Cross-Hole, Down-Hole y Up-Hole; Método de Medición de Ondas Superficiales SASW y MASW; Método de Reflexión y Refracción Sísmica.

La refracción sísmica es un método adecuado para investigar materiales en el subsuelo a profundidades menores a 100 m, el ensayo se realiza según la Norma ASTM D 5777 “Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigations”. Las velocidades sísmicas calculadas están relacionadas a la identificación y cuantificación de diferentes tipos de material detectados en profundidad. La información obtenida a partir del método de refracción tiene diferentes usos, según el

nivel de detalle requerido de la prospección, entre los que destacan la identificación de materiales en profundidad, determinación de espesores de estratos, detección del nivel freático, determinación de la facilidad de excavabilidad de los materiales en la subsuperficie, ejecución de estudios de estabilidad y riesgos geológicos (detección de fallas y cavidades subterráneas), determinación de parámetros dinámicos in situ (cuando es difícil la tarea de extracción de muestras inalteradas), clasificación geomecánica del subsuelo, etc.

Cuando los resultados del método de refracción sísmica se complementan con los sondeos mecánicos, el conocimiento de la geología del sitio en estudio y la experiencia, permite la obtención de información más detallada de las condiciones del subsuelo. Este método se ha utilizado con frecuencia en la definición de estructuras geológicas complejas.

En este documento se presentan los resultados de la investigación geofísica del subsuelo en el Parqueo Norte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de El Salvador, jurisdicción de San Salvador, departamento de San Salvador. Dicha investigación fue realizada con la colaboración de la empresa Consultora Técnica S.A.de C.V.

#### **4.2.1.2 OBJETIVO.**

El objetivo primordial de la realización de este ensayo por refracción sísmica es de carácter académico, pues se pretende proponer un conjunto de pasos prácticos (metodología), basados en los procedimientos generales de campo descritos en la Norma ASTM D-5777 y la observación de los procedimientos realizados por el personal técnico de la empresa CONTECSA, para la adecuada implementación del ensayo.

Adicionalmente, se utilizarán resultados del ensayo para la determinación de espesores y la identificación de los materiales presentes en el sitio. Con lo que se concluye que el tipo de inspección a desarrollar será una Inspección de Reconocimiento.

Por otra parte, con la aplicación del ensayo de refracción sísmica se pretende alcanzar una profundidad promedio de 10 metros bajo la superficie del sitio.

#### **4.2.1.3 GENERALIDADES SOBRE EL MÉTODO DE REFRACCIÓN.**

El método de refracción sísmica consiste en la medición del tiempo de viaje de la primera onda detectada (onda de compresión u onda P) en una serie de puntos (geófonos) separados a intervalos regulares a lo largo de una línea de referencia ubicada sobre la superficie de la tierra, llamada línea de inspección (ver figura 4.01). Las ondas detectadas en cada receptor son originadas artificialmente a partir de una fuente de energía sísmica de tipo impulsiva en una ubicación estratégica conocida como *punto de disparo*. El conjunto de registros obtenidos de la realización del ensayo son recolectados, visualizados, revisados y almacenados por un equipo de adquisición de datos para formar parte de un expediente o archivo digital sobre el cual se realiza el respectivo procesamiento. Los datos contenidos dentro de un expediente están en unidades de tiempo y distancias de recorrido.

El procesamiento de los datos contenidos en un expediente son manipulados para ser presentados en un formato gráfico llamado curva tiempo-distancia o domocrónica, cuya forma esta relacionada con las condiciones geológicas del lugar en estudio. Este gráfico es el punto de partida para determinar la variación de la velocidad de las ondas con

respecto a la profundidad alcanzada durante el desarrollo de un ensayo de refracción sísmica. Las velocidades calculadas están relacionadas a la identificación y cuantificación de diferentes tipos de material detectados en profundidad (ver Tabla 4.01).

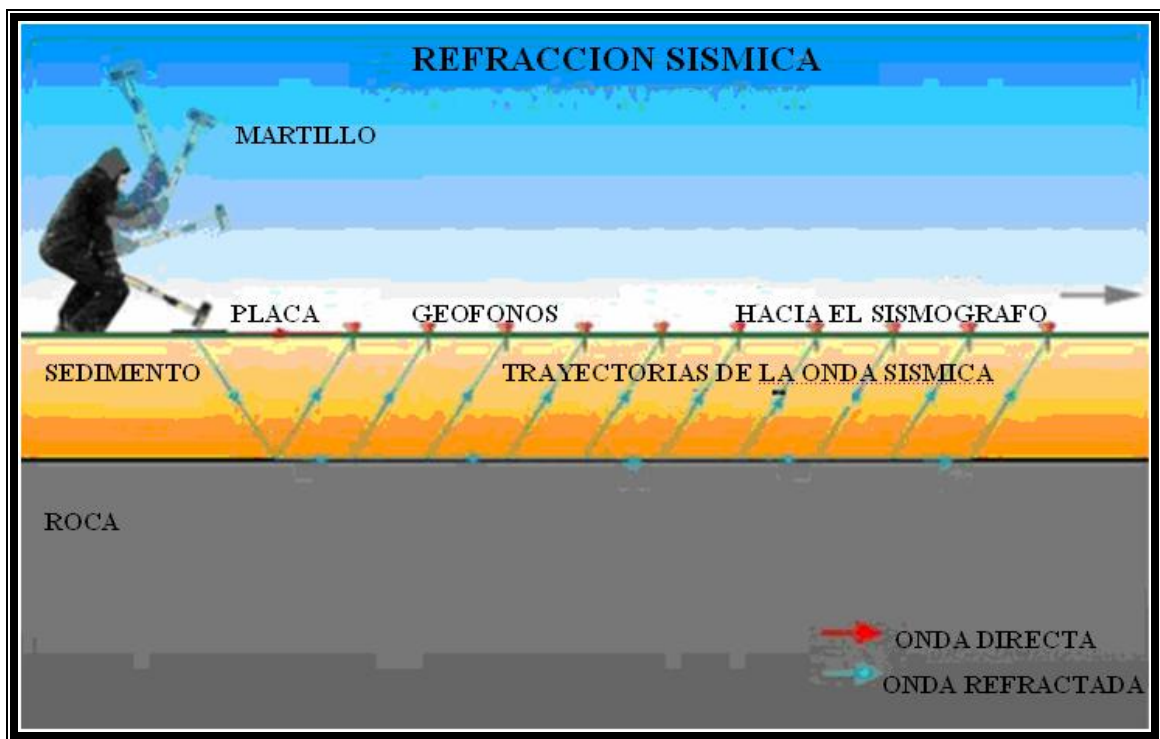


Figura 4.01. Metodología operativa de la refracción sísmica.<sup>2</sup>

<b>MATERIALES</b>	<b>VELOCIDAD</b>	
	<b>ft/s</b>	<b>m/s</b>
<b>Suelo Natural y roca</b>		
Suelo intemperizado	800 a 2000	240 a 610
Grava o arena seca	1500 a 3000	460 a 915
Arena saturada	4000 a 6000	1220 a 1830
Arcilla saturada	3000 a 9000	910 a 2750
Agua	4700 a 5500	1430 a 1665
Agua de mar	4800 a 5000	1460 a 1525
Arenisca	6000 a 13000	1830 a 3960
Esquisto, arcilla esquistosa	9000 a 14000	2750 a 4270
Tiza o Yeso	6000 a 13000	1830 a 3960
Caliza	7000 a 20000	2134 a 6100
Granito	15000 a 19000	4575 a 5800
Roca metamórfica	10000 a 23000	3050 a 7000

Tabla 4.01 Rango de Velocidades para Ondas Compresionales en Suelo y Roca.<sup>24</sup>

## 4.2.2 PLANEAMIENTO DE LA INSPECCION.

### 4.2.2.1 PERSONAL.

El recurso humano necesario para el desarrollo del ensayo de refracción sísmica es el que se indica a continuación (Ver fotografía 4.01):

- a) 1 Técnico operador del sismógrafo para la adquisición de datos.
- b) 3 auxiliares.
- c) 1 motorista.





Fotografía 4.01 Personal de campo requerido para realización de ensayo de refracción sísmica.

El técnico operador debe conocer de la teoría básica de refracción y, en ciertos casos, de los métodos de interpretación utilizados en dicho ensayo; por lo tanto, velará por la aplicación de los procedimientos de campo apropiados para la recolección de datos que sigan estos lineamientos.

#### **4.2.2.2 EQUIPO.**

El equipo a utilizarse en la realización del ensayo de refracción sísmica se detalla a continuación:

- a. Sismógrafo de 12 canales.
- b. 12 Geófonos verticales de 14 Hz.
- c. Cable de tendido para conexión de geófonos.
- d. Cables de extensión del disparador de martillo.
- e. Almádana de 15 libras, adaptado con un switch disparador de martillo.

- f. Placa de impacto de acero 15x15cm y 5/8" de espesor.
- g. Batería 12V.
- h. Cinta métrica 30m, y 8m.
- i. Almádana de 4 lbs y punta de 5/8".
- j. Cinta aislante.
- k. Conos para control de tráfico, con cintas reflejantes.
- l. Cal / Yeso.
- m. Cámara fotográfica digital.
- n. Radios de comunicación (walkie-talkies).
- o. Equipo topográfico (teodolito, nivel fijo, estadias, GPS) opcional.

#### **4.2.2.3 CARACTERÍSTICAS DEL SITIO.**

- De acuerdo con el Mapa Geológico de El Salvador, el Parqueo Norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura (llamado de aquí en adelante como Parqueo Norte) de la Universidad de El Salvador (U.E.S.) se encuentran materiales provenientes de la Formación San Salvador, cuya simbología es "S4", que se refiere a piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas, conocidas como "Tierra Blanca". Así también, se tiene previsto que el espesor de estos materiales se encuentre en el intervalo de 6 a 25 m (Ver figura 4.02).
- Debido al tipo de material presente en la superficie del sitio (Tierra Blanca poco consolidada), se considera suficiente el uso de una almádana de 15 libras como fuente de energía para inspecciones superficiales con la que se puede alcanzar una

profundidad entre 5 y 10 m, es necesario aclarar que el uso de explosivos (pólvoras y dinamita) como fuente de energía no es aplicable en el país, debido a que el ensayo de refracción sísmica es utilizado para un alcance en profundidad muy superficial (0-20m aproximadamente). Adicionalmente, el uso de explosivos es muy restringido.

- El sitio, por tratarse de un parqueo, cuenta con una buena accesibilidad, tanto para vehículos como para peatones, por lo que se prevé un fácil ingreso del vehículo que transporta al personal y al equipo.

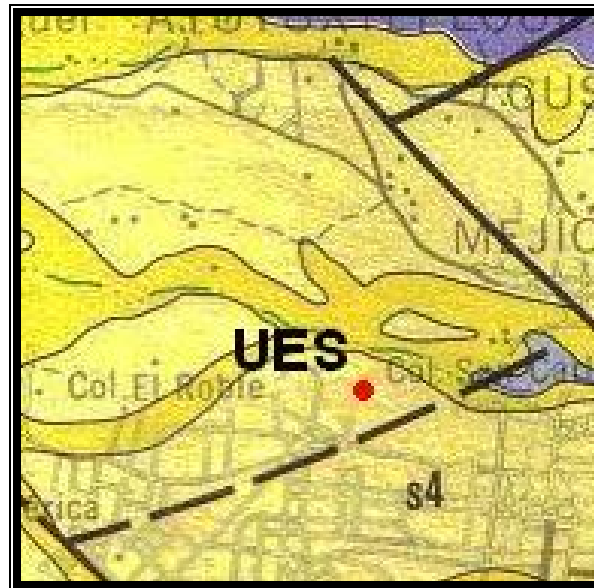


Figura 4.02: Ubicación del parqueo norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura (punto rojo) de la Universidad de El Salvador en el Mapa Geológico de El Salvador.<sup>28</sup>

- Las principales fuentes de ruido son originadas por el tránsito de vehículos y peatones en la periferia del sitio, por lo que se planea realizar el ensayo de refracción

---

<sup>28</sup> Misión Geológica Alemana (1969): “Mapa Geológico de El Salvador” ESC:1:100,000, San Salvador, El Salvador.

sísmica preferentemente un fin de semana (específicamente día sábado), donde la afluencia de estudiantes y vehículo es relativamente baja.

- El sitio tiene las dimensiones siguientes: 20 m aproximadamente en el sentido sur-norte y 60 m aproximadamente en el sentido poniente-oriente; por consiguiente, se tiene previsto realizar el ensayo de refracción en el sentido con mayor longitud, debido a que se puede lograr un mayor alcance del estudio en profundidad. Por otra parte, no se cuenta con limitación de espacio para la realización del ensayo. Solo se tendrá el cuidado de cerrar el paso vehicular en los dos accesos a dicho parqueo para evitar cualquier tipo de inconveniente que pueda interferir con el normal desarrollo del mismo.
- En la actualidad, en este parqueo no se tiene previsto la construcción de alguna estructura en particular (edificio de aulas, laboratorios, etc.).

#### **4.2.2.4 VALORACIÓN DEL CONTRASTE DE VELOCIDAD SÍSMICA.**

- En nuestro medio generalmente sólo se cuenta con información geológica y de perforaciones para exploración del subsuelo (SPT, rotativas).
- Por tratarse de materiales de origen reciente y poco consolidado, se prevé que la velocidad de los materiales piroclásticos y epiclásticos (conocido como “Tierra Blanca”) presenten velocidades de propagación de Ondas P menores a 400 m/s. Así también no se espera un cambio o contraste de velocidad sísmica muy considerable, lo cual estará en función del nivel de compacidad (densidad) del suelo.

- Para el chequeo de los resultados obtenidos en la aplicación del ensayo de refracción sísmica se ubicarán dos sondeos con la prueba de penetración estándar en puntos muy cercanos a la ubicación de la línea de inspección por refracción.

#### **4.2.2.5 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE INTERPRETACIÓN.**

En este caso particular se harán las siguientes suposiciones:

- Los estratos o capas de materiales son homogéneos e isotropos.
- La velocidad de propagación de las ondas aumenta conforme estas alcanzan estratos más profundos (aumento de la velocidad con la profundidad).
- La forma de las fronteras o interfases entre los estratos se asumen que tienen forma plana, referido al hecho que se esperan interfases horizontales o con inclinación constante.
- El método de interpretación a seleccionar es dependiente de las suposiciones hechas respecto a la configuración (interfase plana o no plana, inclinación, extensión, orden de aparición de estratos, etc.) y a las propiedades intrínsecas de los materiales en la subsuperficie (homogeneidad, isotropía, etc.), lo cual será comprobado en el proceso de obtención de velocidades de Ondas P para cada material detectado. Por lo que, el método de interpretación a utilizar en la realización de este ensayo de refracción sísmica será el de Tiempo-Intercepto.

#### **4.2.2.6 DISEÑO DE LA INSPECCIÓN.**

- La localización preliminar de la línea de inspección se realizará con ayuda de un plano topográfico que contiene la planimetría de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la UES.
- Como paso posterior a la realización del ensayo de refracción sísmica, se realizarán dos sondeos con la prueba de penetración estándar (S.P.T.).
- En el sitio de interés se tiene previsto la realización de una única línea de inspección por refracción, ya que esto se encuentra en función de la disponibilidad del equipo por parte de la empresa propietaria del mismo, que en este caso es la empresa CONTECSA.
- La orientación de la línea (tendido de geófono) será en dirección poniente-oriental, debido a que en esta dirección se tiene mayor espacio disponible para facilitar la realización de la prueba.
- Se utilizarán los resultados del ensayo de refracción sísmica para la determinación de espesores y la identificación de los materiales presentes en el sitio. Por lo que, se concluye que el tipo de inspección a desarrollar será de tipo Preliminar o de Reconocimiento.
- La separación entre geófonos que se utilizará para la realización de la Inspección de Reconocimiento será de tres metros.
- El número de puntos de disparos es de cuatro, donde se utilizarán como fuente de energía una almádana de 15 libras. Los disparos estarán ubicados a 3 y 10 metros de los geófonos ubicados en cada uno de los extremos de la línea de inspección.

- La línea de inspección tendrá una longitud de 53 metros con lo que se proyecta alcanzar una profundidad aproximada entre los 10 y 17.5 m ( $Z = L/5 - L/3$ ).

#### 4.2.3 TRABAJO DE CAMPO.

El trabajo de campo se realizó el día sábado 20 de septiembre de 2007, a las 9:00 a.m., y consistió en la obtención de registros de una línea o tendido de inspección por refracción que tenía una longitud de 53 metros. La ubicación de la línea fue el Parqueo Norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, frente al edificio de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad de El Salvador. En la figura 4.03 se presenta un esquema de ubicación de la línea de inspección por refracción realizada.

La línea de inspección se realizó según la configuración mostrada en la figura 4.04. Se utilizaron 12 geófonos verticales de 14 Hz separados a una distancia uniforme. Los puntos de disparo utilizados fueron cuatro, y se pueden identificar en la figura 4.04. La fuente empleada consistió de un mazo de 15 libras de peso.

La tabla 4.02 resume las características de la línea de inspección realizada.

LINEA	LONGITUD (m)	ORIENTACION	CANTIDAD DE GEOFONOS	PERFIL
LR-01	53	W-E	12@3.0 m	A-B

Tabla 4.02. Configuración de línea de inspección por refracción.<sup>6</sup>

La topografía del sitio es actualmente plana, con vegetación menor y no se encontraron cúmulos de basura, desperdicios de concreto, o restos de chatarra, maleza y materiales de construcción (ver fotografía 4.02).

Con relación al clima, se tuvo cielo despejado, con escasas posibilidades de lluvia, la temperatura osciló alrededor de los 29 grados centígrados. Por otra parte, el sitio posee un buen sistema de drenaje, lo que se pudo constatar debido a que no se encontró indicios de cúmulos de humedad (fango o lodo) en ninguna parte del mismo.

Como preparación del lugar de estudio, se aisló el sitio donde se realizará la inspección por refracción, especialmente del ingreso de vehículos y de personas ajenas al grupo de técnicos de campo.



Figura 4.03: Ubicación de línea sísmica.  
(Fuente: Escuela de Arquitectura, U.E.S.).



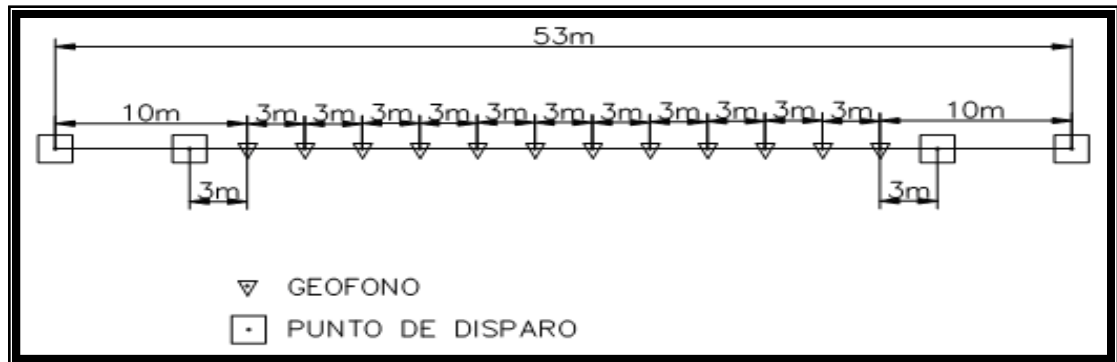


Figura 4.04. Configuración utilizada en el ensayo de Refracción Sísmica.<sup>6</sup>



Fotografía 4.02. Vista general del Parqueo Norte de la F.I.A., U.E.S.

Para el replanteo de los puntos de la línea de inspección en campo, se utilizó como referencia el cordón-cuneta de la calle de acceso, el cual, pasa por el costado sur de la zona en estudio (ver fotografía 4.03).



Fotografía 4.03. Toma de referencia, por medio de equipo Global Position System (G.P.S.), de la línea de inspección por refracción.

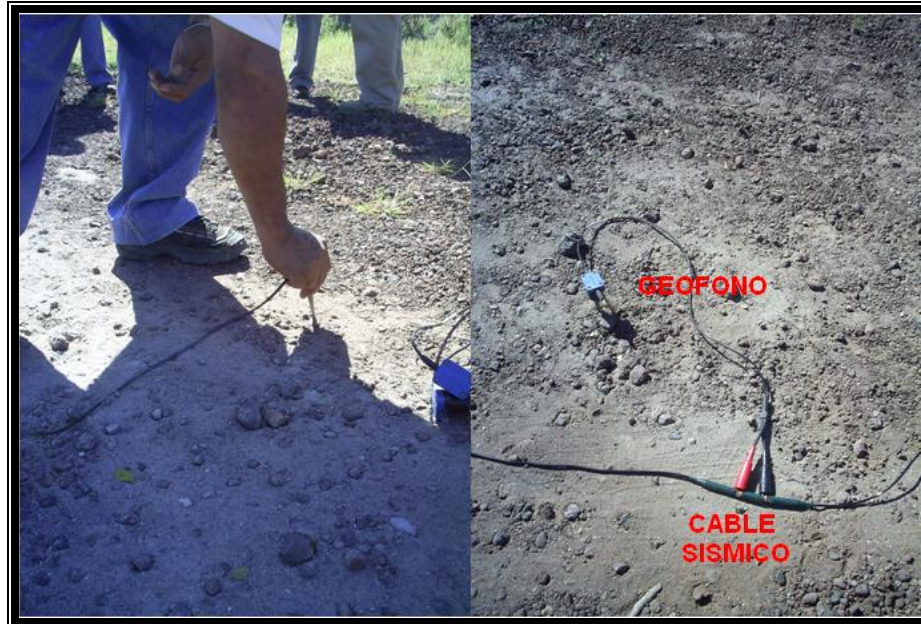
Una vez dada la ubicación de la localización de línea de inspección, los pasos seguidos para la obtención de los registros fueron los siguientes:

1. Marcación de ubicación de geófonos y puntos de disparo, en línea recta a separación uniforme. Los puntos de disparos, en donde se generan las ondas sísmicas, se colocaron al inicio y final de la línea a una distancia de tres y siete metros del geófono más cercano (ver fotografía 4.04 y figura 4.04).



Fotografía 4.04. Ejemplo de trazo de la línea de inspección por refracción (izquierda). Manera como se realizó el trazo en la UES (derecha).

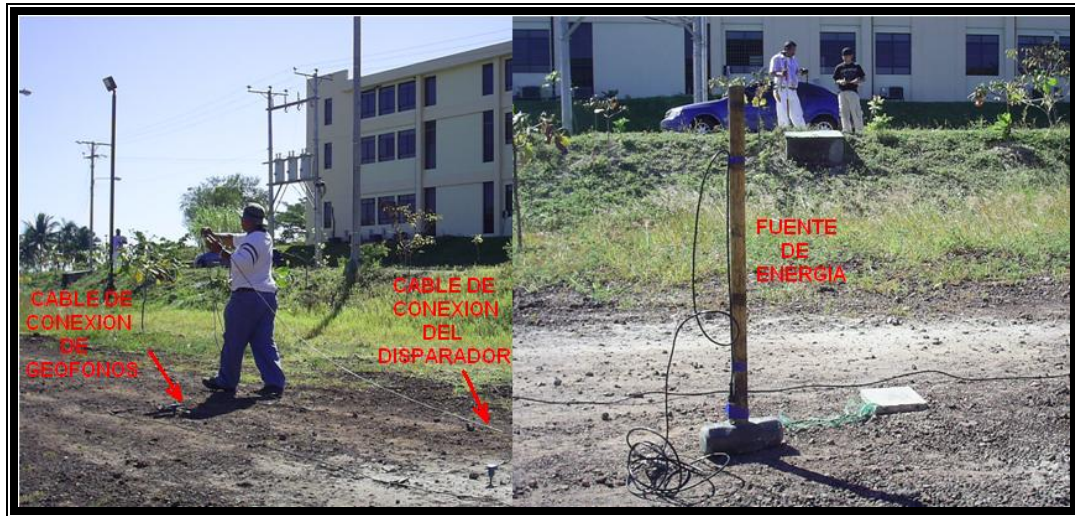
2. Tendido de geófonos. Se colocaron los geófonos en las posiciones marcadas y se conectan al cable de tendido, el cual a su vez se conecta al sismógrafo. Por practicidad se recomendó ubicar el cable de conexión de los geófonos al sismógrafo a la izquierda de la línea de geófonos, tomando como referencia la ubicación del sismógrafo (ver fotografía 4.05).



Fotografía 4.05 Colocación de geófonos (izquierda). Conexión de geófonos al cable de los geófonos (cable sísmico), el cual que transmite las señales al sismógrafo (derecha).

3. Despliegue de cable de extensión para disparador o trigger. El disparador consiste en un dispositivo colocado a la fuente sísmica (mazo de 15 libras), el cual marca el tiempo cero de registro. Así mismo, por practicidad, se recomendó ubicar dicho cable a la derecha de la línea de geófonos, tomando como referencia la ubicación del sismógrafo (ver fotografía 4.06).





Fotografía 4.06: Colocación del cable de conexión del disparador o trigger (izquierda) a la fuente de energía (mazo de 15 libras).

4. Conexión de todo el equipo (ver fotografía 4.07 y figura 4.05).



Fotografía 4.07 Conexión de los cables de los geófonos y del disparador al sismógrafo.

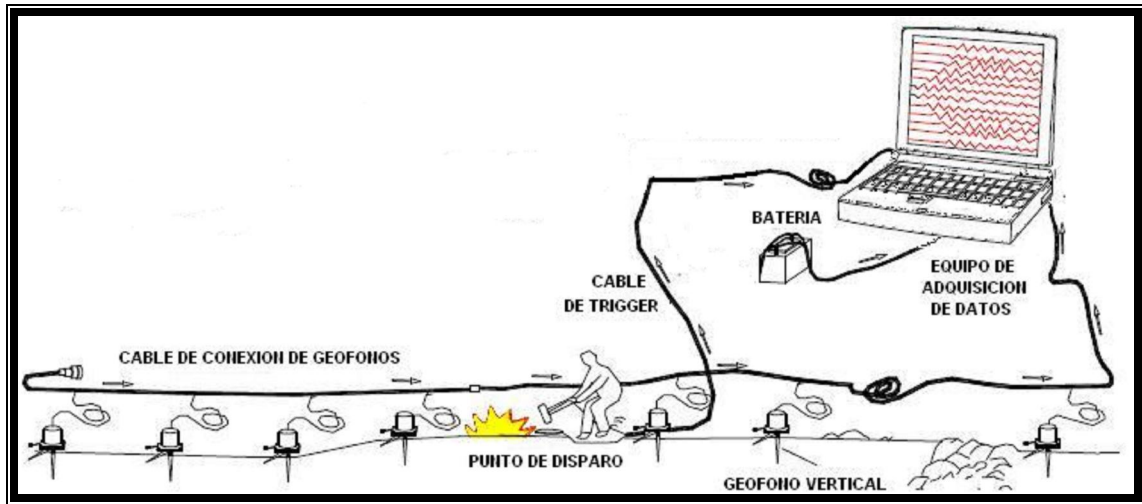


Figura 4.05. Esquema general de la conexión de todos los elementos del equipo utilizado en ensayo de refracción sísmica.<sup>4</sup>

5. Configuración de parámetros de adquisición en el sistema controlador del sismógrafo.
  - a. El nombre asignado a la inspección por refracción fue REFRA-UES.
  - b. La fecha y hora del inicio del ensayo fue sábado 20 de septiembre de 2007, a las 10:00 a.m. La ubicación del sitio es Parqueo Norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, frente al edificio que alberga a la Escuela de Ingeniería Industrial. Todo ello ubicado dentro del Campus de la UES, en el municipio de San Salvador.
  - c. El número correlativo de la línea de inspección fue 2530, siguiendo el registro que realiza la empresa propietaria del equipo. Por otra parte, para cada uno de los puntos de disparos que se encuentran ubicados en la línea de inspección en las coordenadas a 0, 3, 46 y 53 m (de poniente a oriente), se identificó al registro de ondas como 2531, 2532, 2533 y

2534, respectivamente. La unidad de longitud que se utilizó fue el metro (m). La unidad de medición de tiempo fue el milisegundo (ms).

- d. Las coordenadas de ubicación y elevación de los cuatros puntos de disparo, de los geófonos #6, #11 y #12 y de seis puntos del terreno utilizados como amarre de la línea de inspección se detallan en la figura 4.06 y Tabla 4.03. Esta información fue obtenida por medio de un equipo G. P.S. (Global Position System).

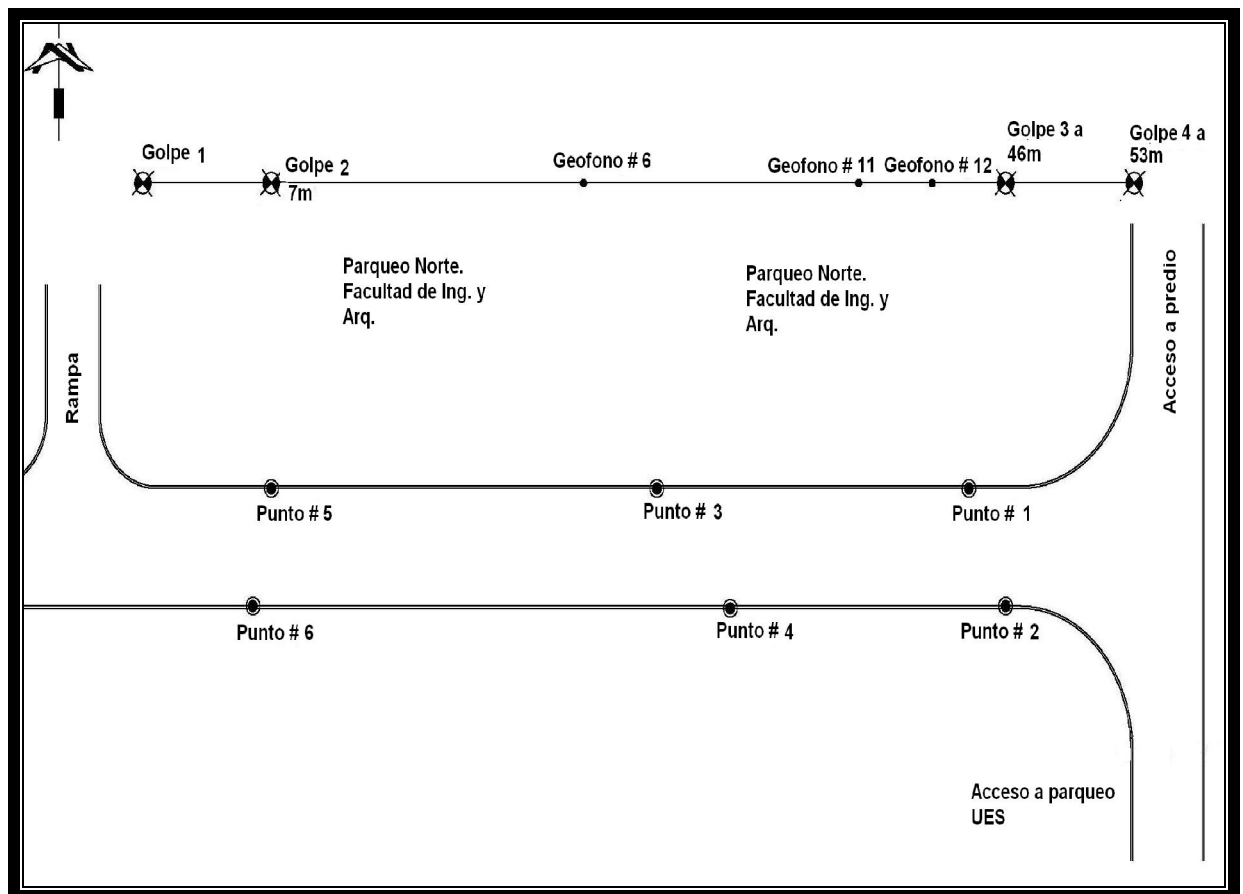


Figura 4.06. Ubicación de los puntos de disparo, geófonos y puntos de amarre utilizados en el trazo de la línea de inspección.<sup>6</sup>

CUADRO DE UBICACIONES			
COORDENADAS ELEMENTO	NORTE	ESTE	ELEVACION
GOLPE #1	288892	478300	684
GOLPE #2	288892	478307	684
GOLPE #3	288892	478347	684
GOLPE #4	288892	478354	684
GEOFONO #6	288892	478324	684
GEOFONO #11	288892	478339	684
GEOFONO #12	288892	478343	684
PUNTO #1	288879	478345	685
PUNTO #2	288874	478347	685
PUNTO #3	288879	478328	685
PUNTO #4	288873	478332	685
PUNTO #5	288874	478306	685
PUNTO #6	288879	478307	685

Tabla 4.03. Cuadro de coordenadas de los puntos utilizados para el trazo y amarre de la línea de inspección realizada en la UES.<sup>6</sup>

- e. El número de geófonos utilizados fue de 12, y está en función del equipo con que cuenta la empresa propietaria.
- f. El intervalo de muestreo de las ondas fue previsto en 0.25 ms y la longitud del registro fue previsto en 400 ms, lo anterior está en función del tipo de ensayo geofísico a realizar, la fuente de generación de ondas y la capacidad del equipo.



- g. No fue necesaria la utilización de filtros de reducción de señales de ruido en el proceso de adquisición de datos, debido al bajo nivel de ruido en el sitio. Además, no fue necesario el uso de amplificador de señales registradas en los geófonos, debido a que la fuente sísmica utilizada (almádana de 15 lb) provee la energía suficiente a las ondas para ser registradas.
- h. Finalmente, se utilizó apilamiento de las señales(En cada punto de disparo se registran varios golpes y la señal de un golpe es acumulada al anterior para mejorar la señal) producidas por la fuente sísmica (almádana de 15 lb), realizando de cuatro a cinco golpes en cada uno de los puntos de disparo, con el objeto de mejorar la recepción de las señales en los geófonos más lejanos.

6. Adquisición de datos. Se golpea una placa de acero de aproximadamente 15x15x1.5 cm con el mazo de 15 libras, en los puntos de disparo señalados (ver fotografía 4.08 y figuras 4.07, 4.08, 4.09 y 4.10).



Fotografía 4.08. Uso de la fuente de energía (mazo de 15 libras) en cada uno de los cuatro puntos de disparo trazados.

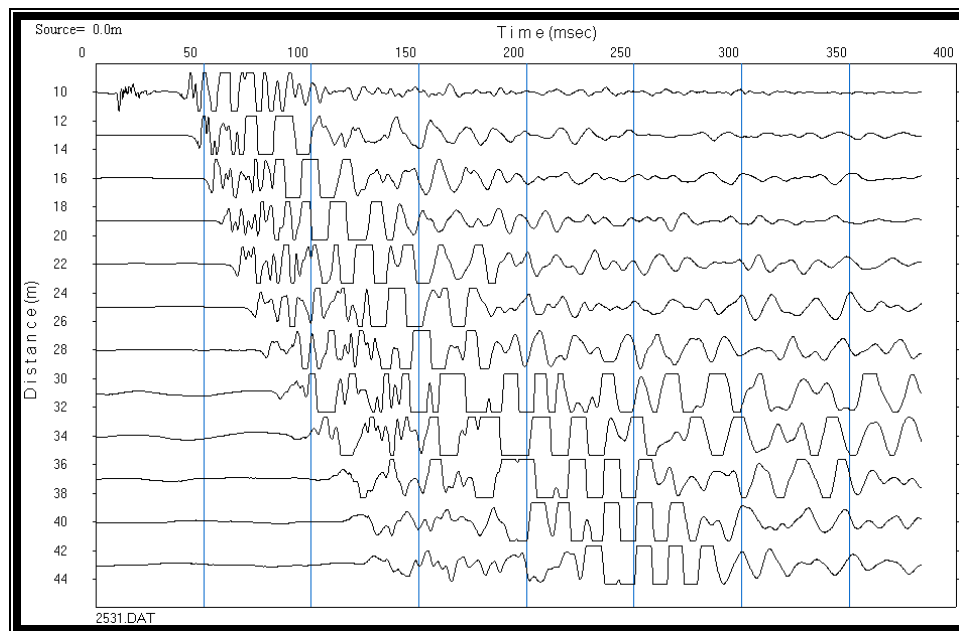


Figura 4.07. Registro sísmico 2531.DAT obtenido del punto de disparo ubicado en la coordenada cero m (0.0), a partir del extremo poniente de la línea de inspección.<sup>6</sup>

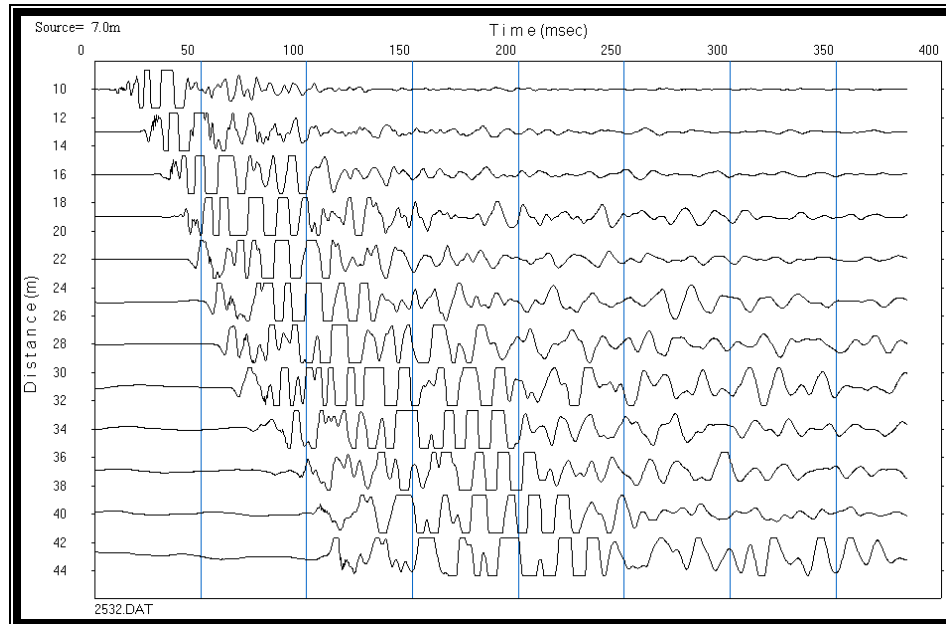


Figura 4.08. Registro sísmico 2532.DAT obtenido del punto de disparo ubicado en la coordenada siete m (7.0), a partir del extremo poniente de la línea de inspección.<sup>6</sup>

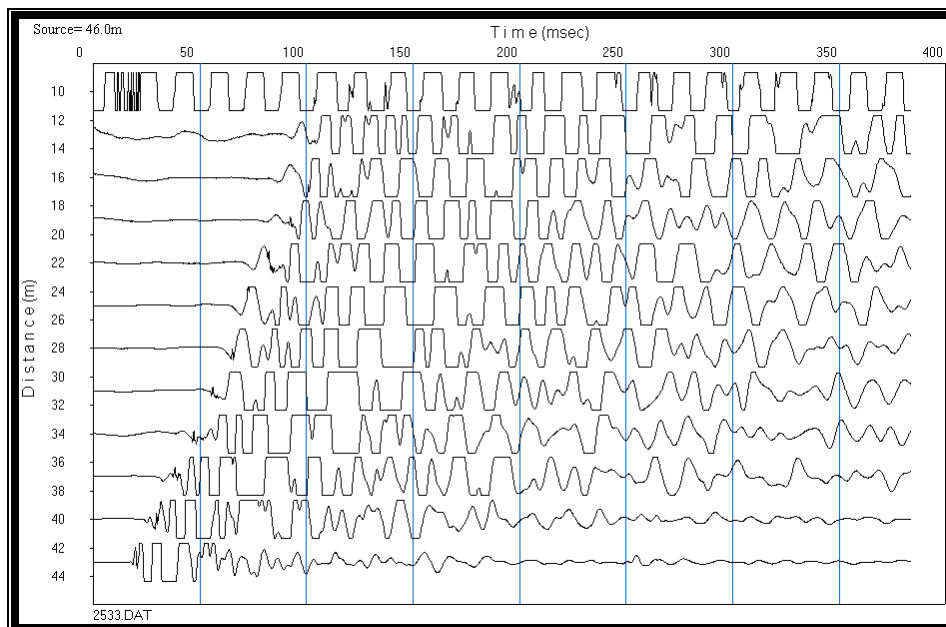


Figura 4.09. Registro sísmico 2533.DAT obtenido del punto de disparo ubicado en la coordenada cuarenta y seis m (46.0), a partir del extremo poniente de la línea de inspección.<sup>6</sup>

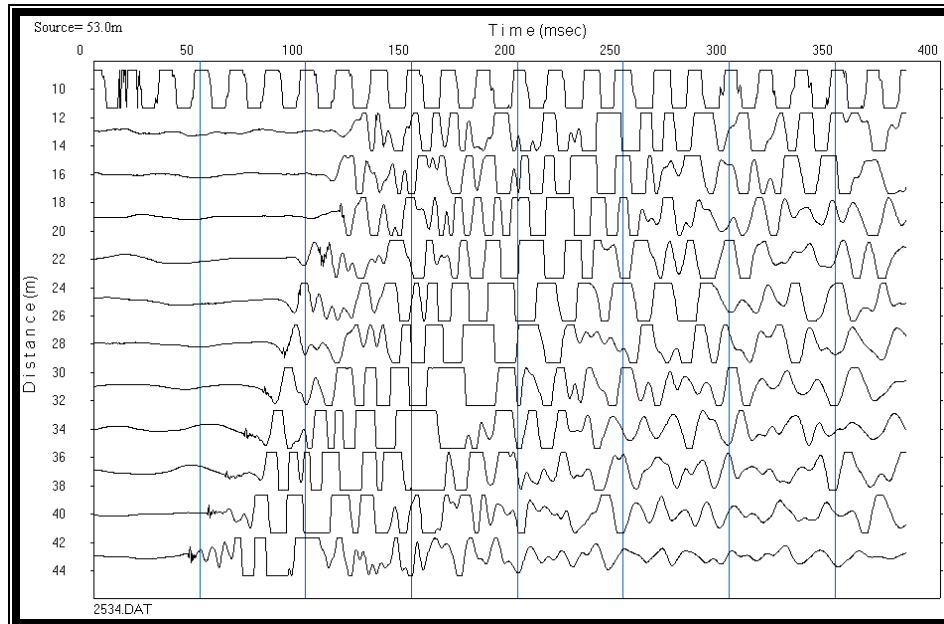


Figura 4.10. Registro sísmico 2534.DAT obtenido del punto de disparo ubicado en la coordenada cincuenta y tres m (53.0), a partir del extremo poniente de la línea de inspección.<sup>6</sup>

## 4.2.4 PROCESAMIENTO DE DATOS.

### 4.2.4.1 PROCESAMIENTO DE REFRACCIÓN SÍSMICA.

Los pasos para obtener los perfiles sísmicos fueron:

- Identificación de primeros arribos de onda P. Esto se realiza para cada traza de un registro que corresponde a un punto de disparo de una línea de inspección. Es decir, se procesaron 4 registros para la línea de inspección, señalando los puntos de llegada de las ondas sísmicas a cada receptor. Las figuras 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14 muestran este proceso. En las tablas 4.04, 4.05, 4.06 y 4.07 se presentan los tiempos de los primeros arribos detectados para cada uno de los cuatro disparos utilizados. Para la identificación de los primeros arribos fue necesaria la

verificación de nivel de ruido en los registros sísmicos obtenidos en campo. Esto se hace por medio de la ampliación en la apariencia de las trazas (registro individual de cada geófono) y poniendo especial cuidado en los primeros registros de señales en cada una de ellas. Principalmente se puede apreciar la mayor influencia del nivel de ruido en los receptores más alejados al punto de disparo o más cercanos a fuentes de ruido, donde las señales poseen frecuencias similares o bien menores a la frecuencia que posee el ruido generado por viento, olas del océano, tráfico y otras fuentes, lo cual no permite una clara identificación del primer arribo de señales provenientes del disparo. Posterior a la verificación de los registros sísmicos, se procedió a utilizar los filtros de visualización, los cuales son utilizados para atenuar el efecto del ruido causado por el viento, tráfico y otras fuentes en los registros.

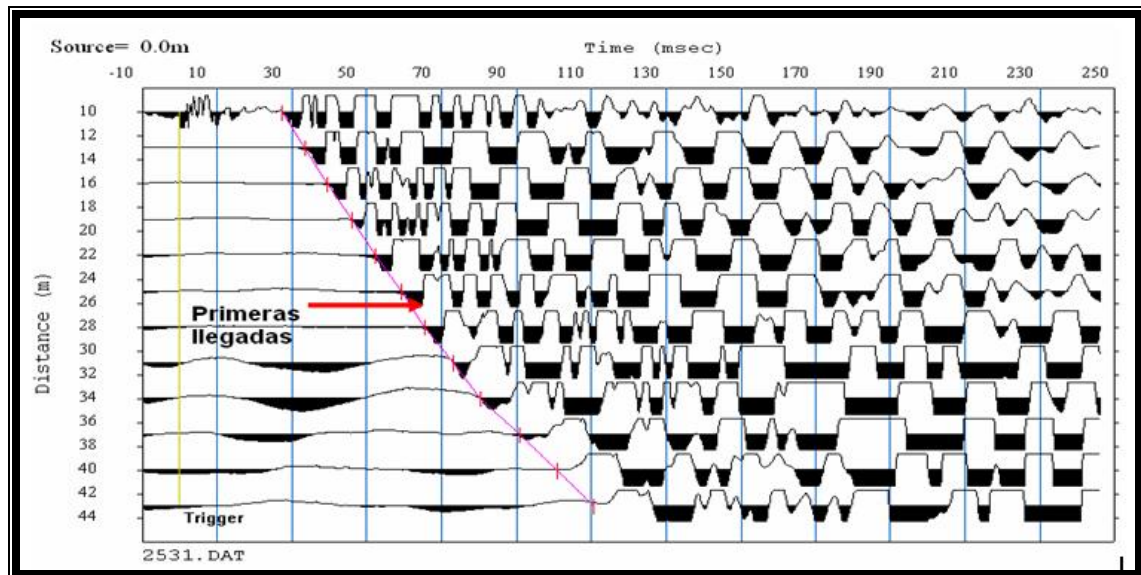


Figura 4.11. Detección de primeros arribos en registro sísmico 2531.DAT obtenido del punto de disparo ubicado en la coordenada cero m (0.0), a partir del extremo poniente de la línea de inspección.<sup>6</sup>

Elemento	Ubicación en Línea de Inspección, orientación W-E (m)	Tiempo del primer arribo (ms)
SP1 (fuente sísmica)	0	0.00
G1	10	27.05
G2	13	33.63
G3	16	39.69
G4	19	46.54
G5	22	53.12
G6	25	60.76
G7	28	66.55
G8	31	72.61
G9	34	78.93
G10	37	89.03
G11	40	99.21
G12	43	110.45

Tabla 4.04. Cuadro resumen de los doce (12) valores de tiempo para los primeros arribos de ondas detectados en cada uno de los geófonos, a partir del disparo ubicado en la coordenada cero (0.0) metros, línea de inspección por refracción sísmica en U.E.S.<sup>6</sup>

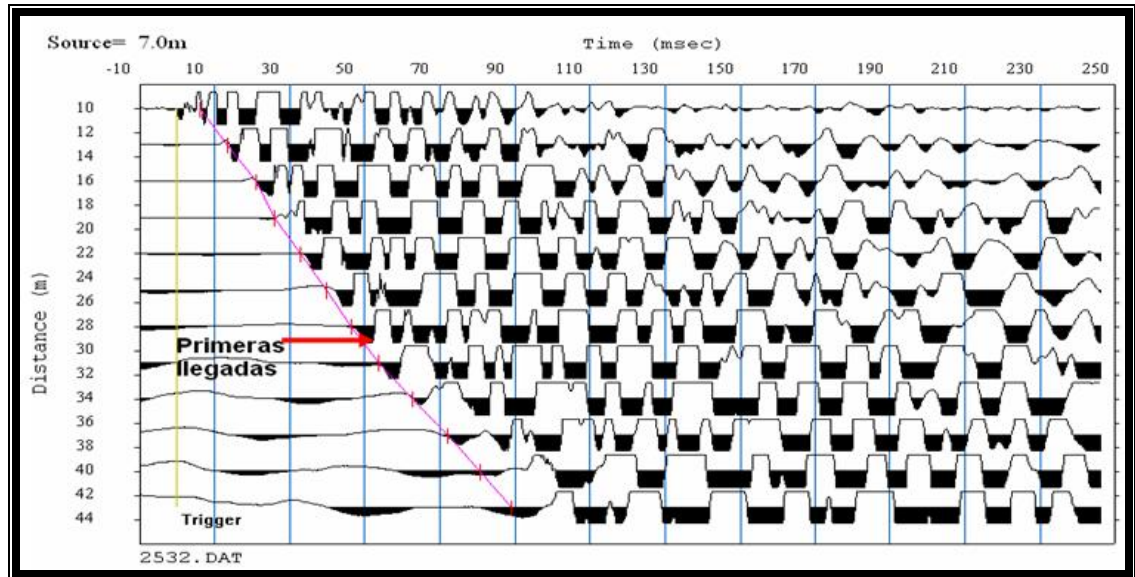


Figura 4.12. Detección de primeros arribos en registro sísmico 2532.DAT obtenido del punto de disparo ubicado en la coordenada siete m (7.0), a partir del extremo poniente de la línea de inspección.<sup>6</sup>

Elemento	Ubicación en Línea de Inspección, orientación W-E (m)	Tiempo del primer arribo (ms)
SP2 (fuente sísmica)	7	0.00
G1	10	6.15
G2	13	13.35
G3	16	20.73
G4	19	27.05
G5	22	33.37
G6	25	39.69
G7	28	45.66
G8	31	51.98
G9	34	62.16
G10	37	71.47
G11	40	80.78
G12	43	90.70

Tabla 4.05. Cuadro resumen de los doce (12) valores de tiempo para los primeros arribos de ondas detectados en cada uno de los geófonos, a partir del disparo ubicado en la coordenada siete (7.0) metros, línea de inspección por refracción sísmica en U.E.S.<sup>6</sup>

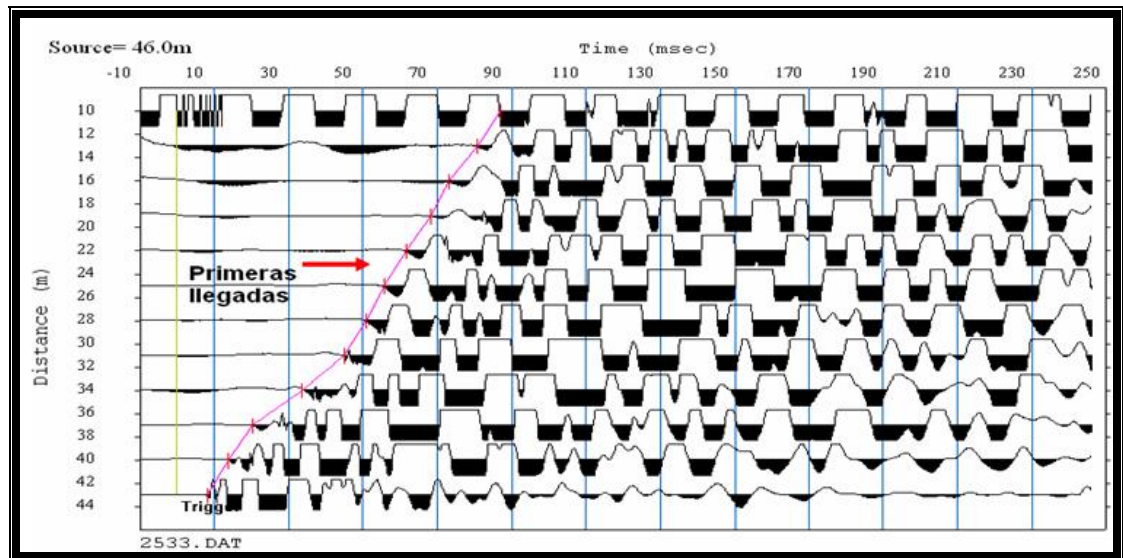


Figura 4.13. Detección de primeros arribos en registro sísmico 2533.DAT obtenido del punto de disparo ubicado en la coordenada cuarenta y seis m (46.0), a partir del extremo poniente de la línea de inspección.<sup>6</sup>

Elemento	Ubicación en Línea de Inspección, orientación W-E (m)	Tiempo del primer arribo (ms)
G1	10	86.83
G2	13	80.51
G3	16	75.33
G4	19	69.54
G5	22	62.69
G6	25	56.63
G7	28	50.40
G8	31	45.13
G9	34	33.63
G10	37	20.46
G11	40	13.88
G12	43	8.09
SP3 (fuente sísmica)	46	0.00

Tabla 4.06. Cuadro resumen de los doce (12) valores de tiempo para los primeros arribos de ondas detectados en cada uno de los geófonos, a partir del disparo ubicado en la coordenada cuarenta y seis (46.0) metros, línea de inspección por refracción sísmica en U.E.S.<sup>6</sup>



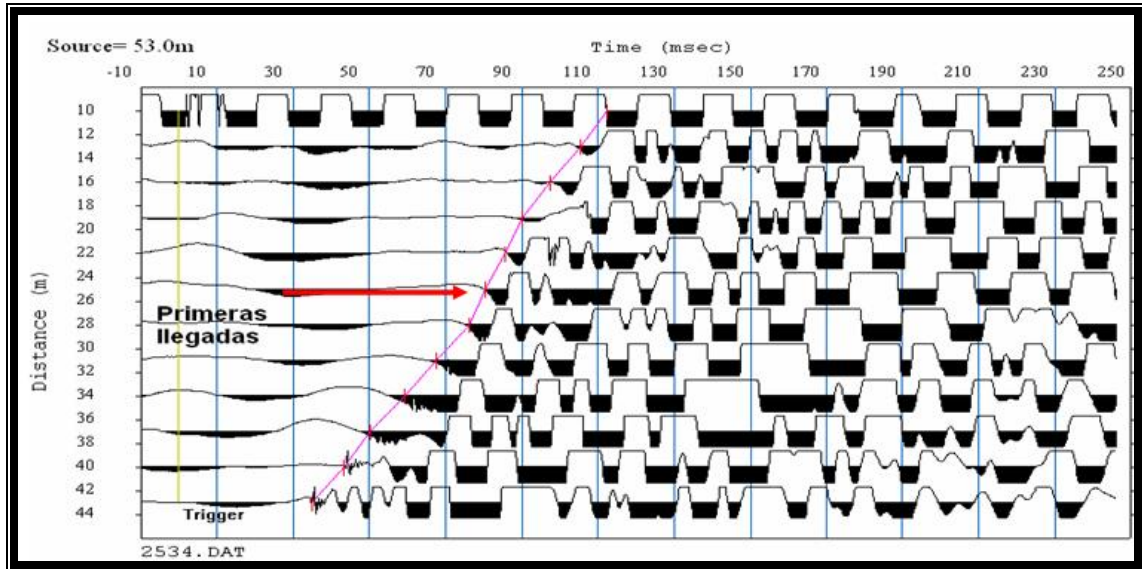


Figura 4.14. Detección de primeros arribos en registro sísmico 2534.DAT obtenido del punto de disparo ubicado en la coordenada cincuenta y tres m (53.0), a partir del extremo poniente de la línea de inspección.<sup>6</sup>

Elemento	Ubicación en Línea de Inspección, orientación W-E (m)	Tiempo del primer arribo (ms)
G1	10	112.38
G2	13	104.39
G3	16	97.54
G4	19	89.91
G5	22	85.78
G6	25	80.25
G7	28	75.33
G8	31	67.34
G9	34	59.18
G10	37	51.19
G11	40	43.82
G12	43	35.56
SP4 (fuente sísmica)	53	0.00

Tabla 4.07. Cuadro resumen de los doce (12) valores de tiempo para los primeros arribos de ondas detectados en cada uno de los geófonos, a partir del disparo ubicado en la coordenada cincuenta y tres (53.0) metros, línea de inspección por refracción sísmica en U.E.S.<sup>6</sup>

- Elaboración curvas tiempo-distancia (domocrónicas). En la figura 4.15 se muestra las curvas tiempo-distancia, obtenidas a partir de las tablas 4.04, 4.05, 4.06 y 4.07.

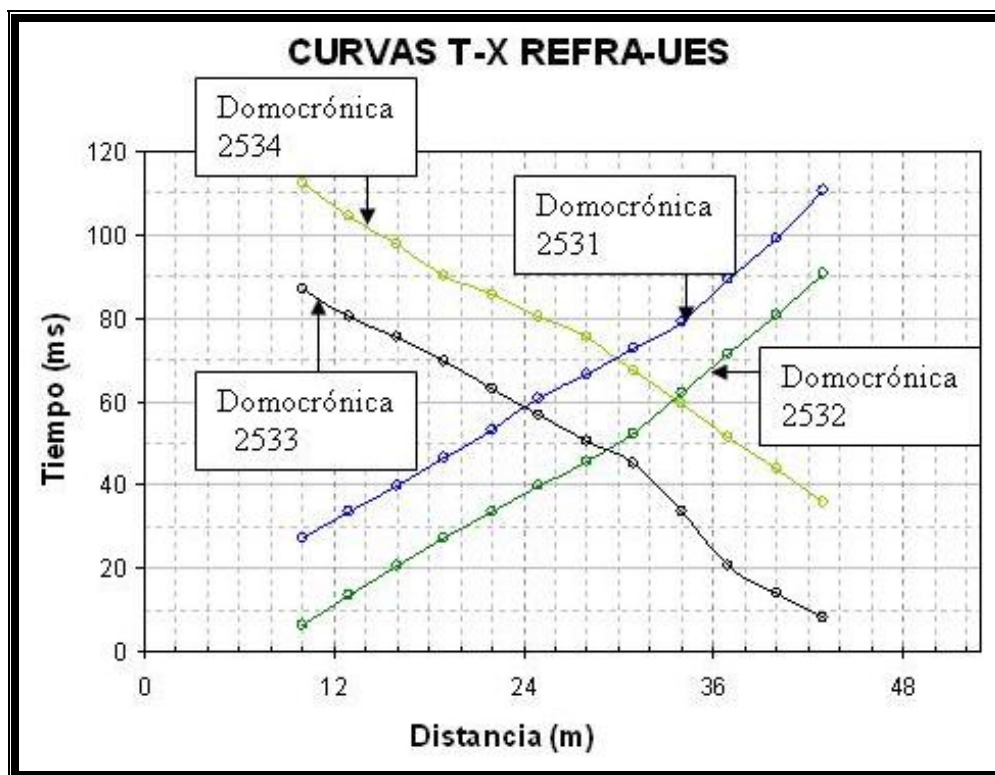


Figura 4.15 Curvas tiempo-distancia línea LR-01.<sup>6</sup>

- Identificación de estratos en las curvas tiempo-distancia y asignación de estrato a cada punto de las curvas. En la figura 4.16 se muestra la identificación de los estratos 1, 2 y 3 en cada una de las cuatro domocrónicas. En color rosado, amarillo y verde claro se identificó los estratos 1, 2 y 3, respectivamente.

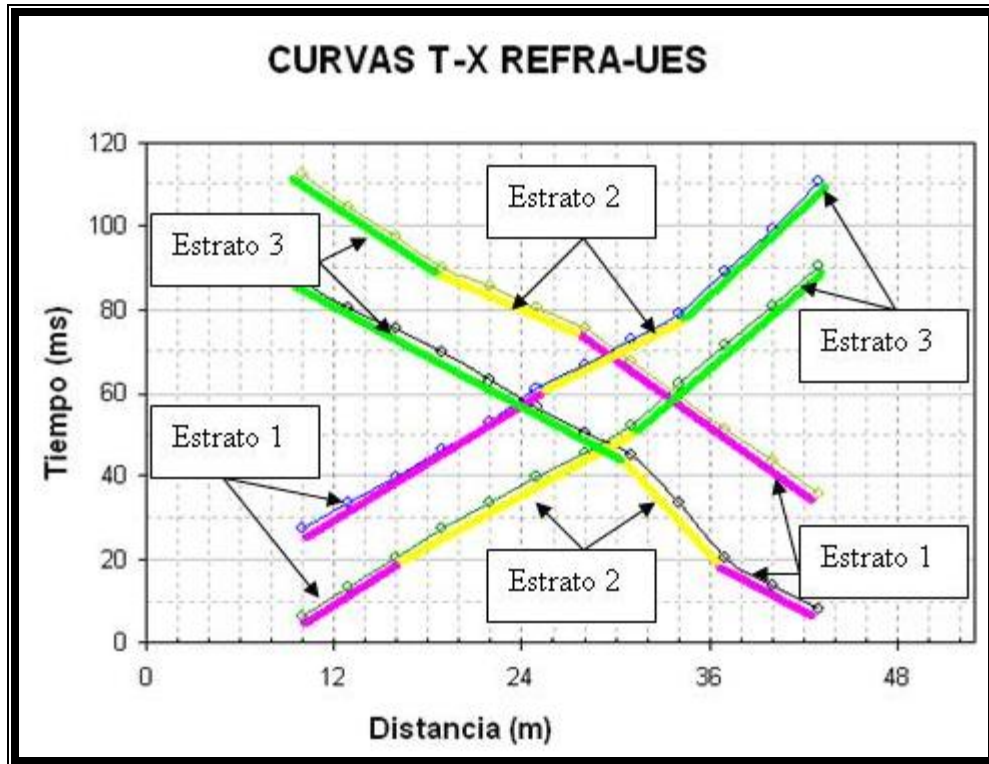


Figura 4.16: Identificación de estratos 1 (línea rosada), estrato 2 (línea amarilla) y estrato 3 (línea verde claro) en cada domocrónica de la línea de inspección por refracción LR-01.<sup>6</sup>

Proceso de cálculo del inverso de la pendiente de cada tramo de domocrónica (ver figuras 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20) y su relación a cada uno de los tres estratos identificados en la figura 4.16.

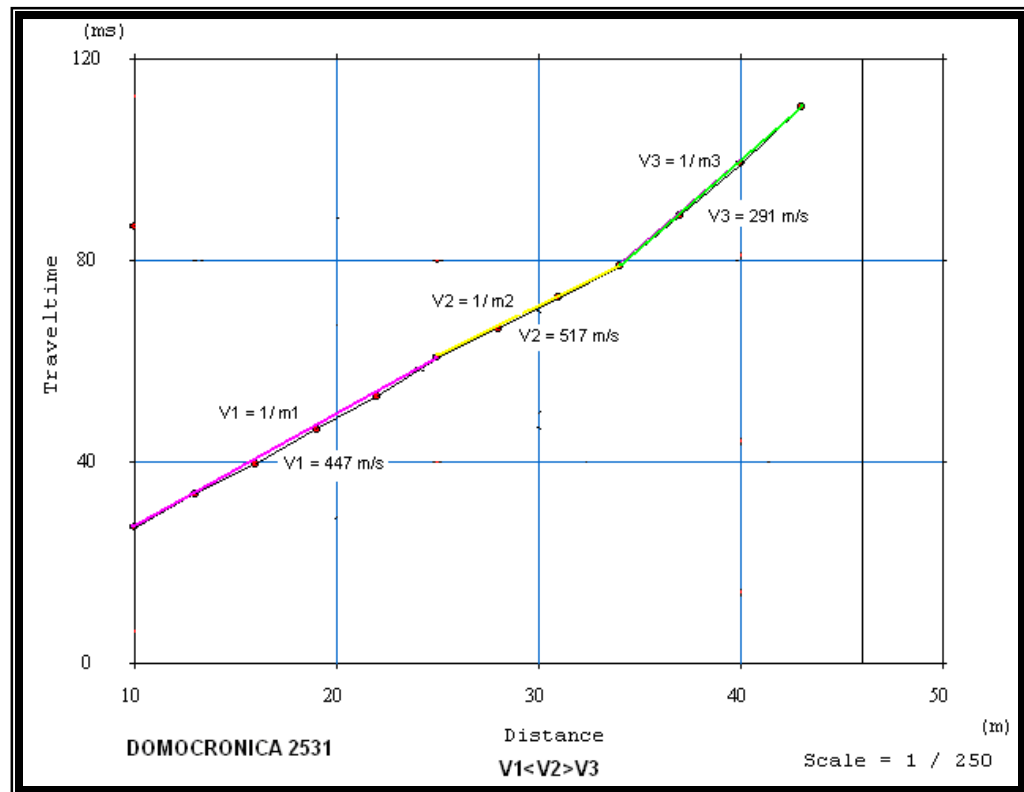


Figura 4.17. Cálculo de la velocidad (valor inverso de la pendiente) de los tres tramos de la domocrónica 2531.<sup>6</sup>

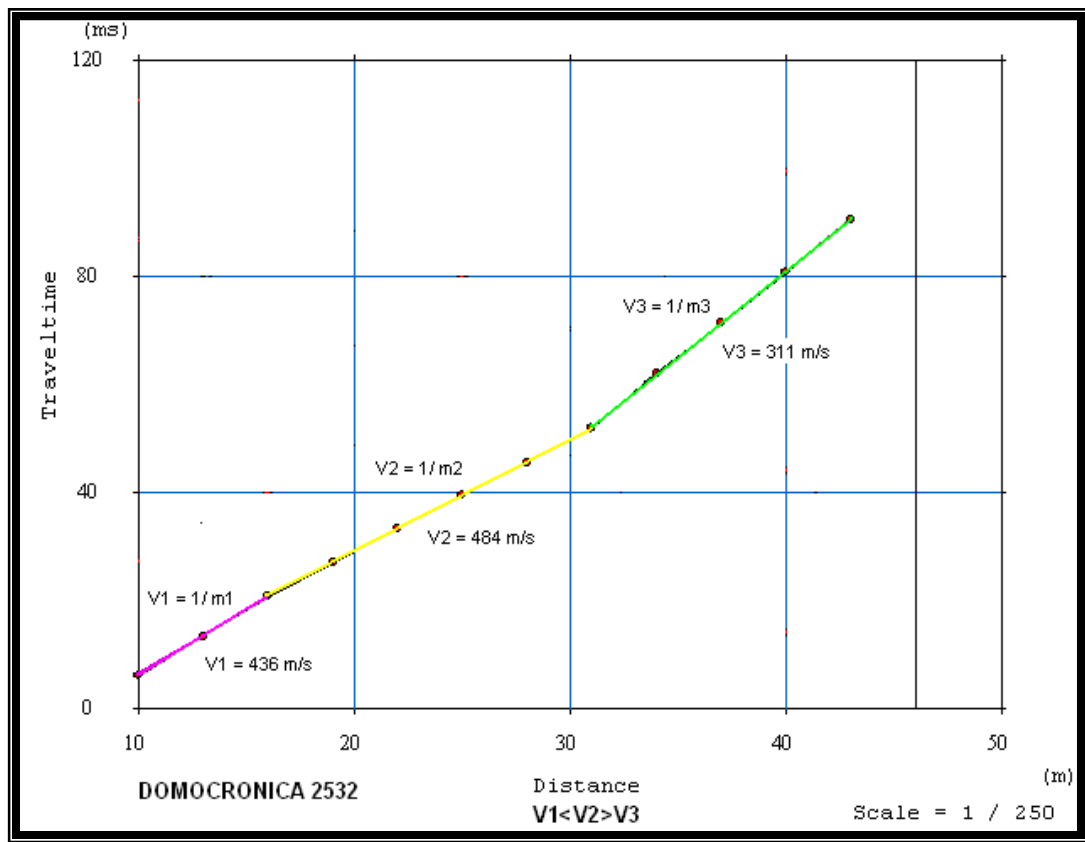


Figura 4.18. Cálculo de la velocidad (valor inverso de la pendiente) de los tres tramos de la domocrónica 2532.<sup>6</sup>

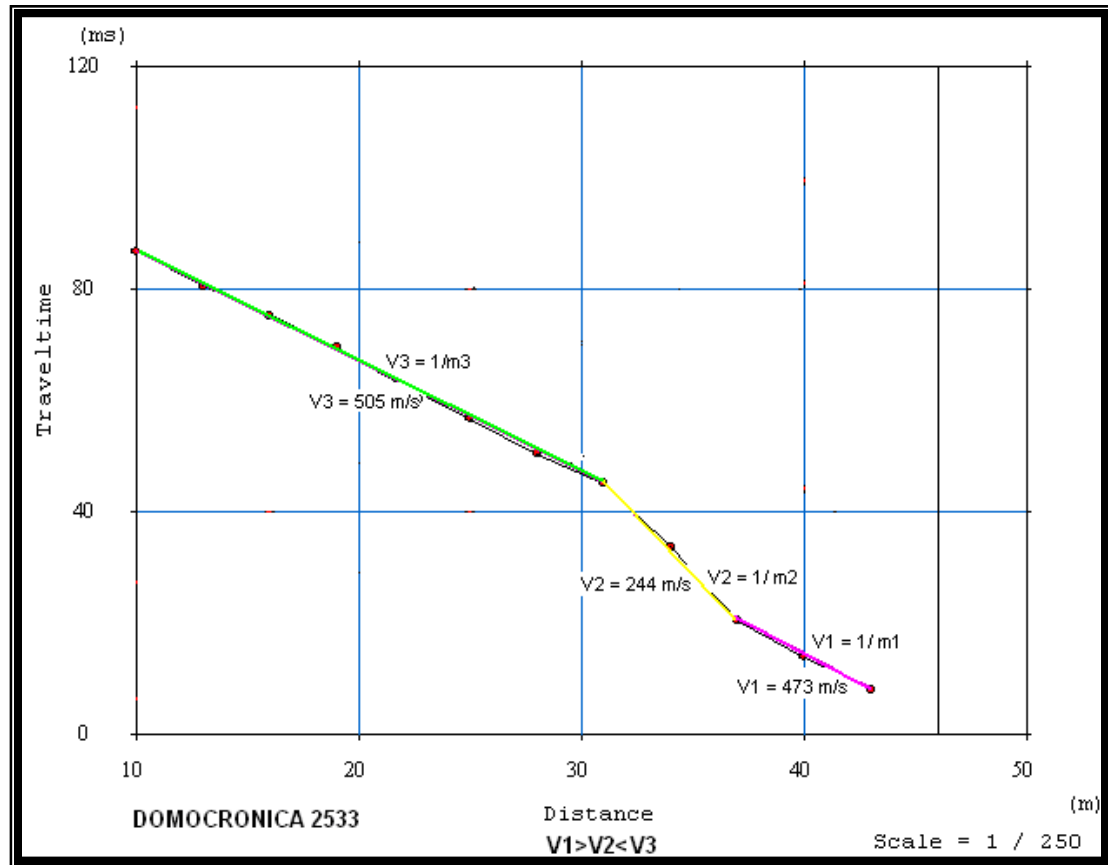


Figura 4.19 Cálculo de la velocidad (valor inverso de la pendiente) de los tres tramos de la domocrónica 2533.<sup>6</sup>

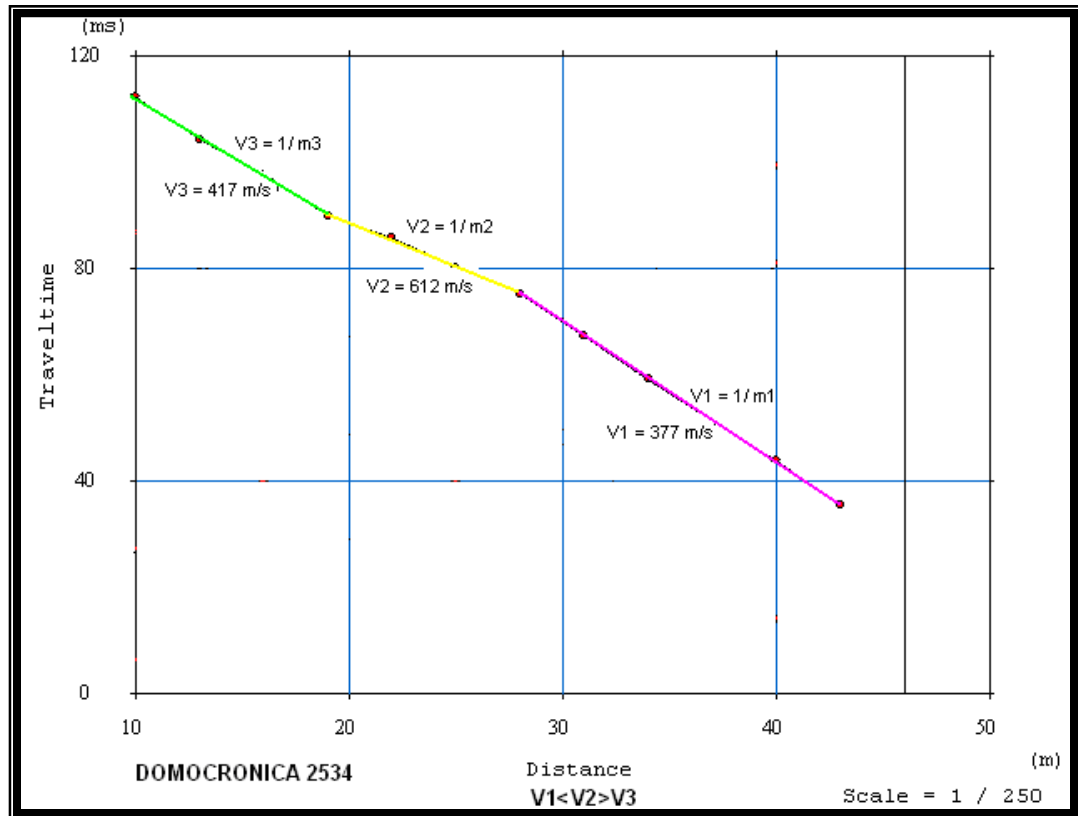


Figura 4.20. Cálculo de la velocidad (valor inverso de la pendiente) de los tres tramos de la domocrónica 2534.<sup>6</sup>

- Inversión de las curvas tiempo-distancia para obtención de perfil sísmico (ver figura 4.21). Debido a que no se cumple la suposición que la velocidad aumenta con la profundidad, el método tiempo-intercepto no es aplicable en este caso particular. Por esta razón fue necesaria la utilización del módulo PLOTREFA del programa SEISIMAGER/2D software para la obtención del perfil sísmico.

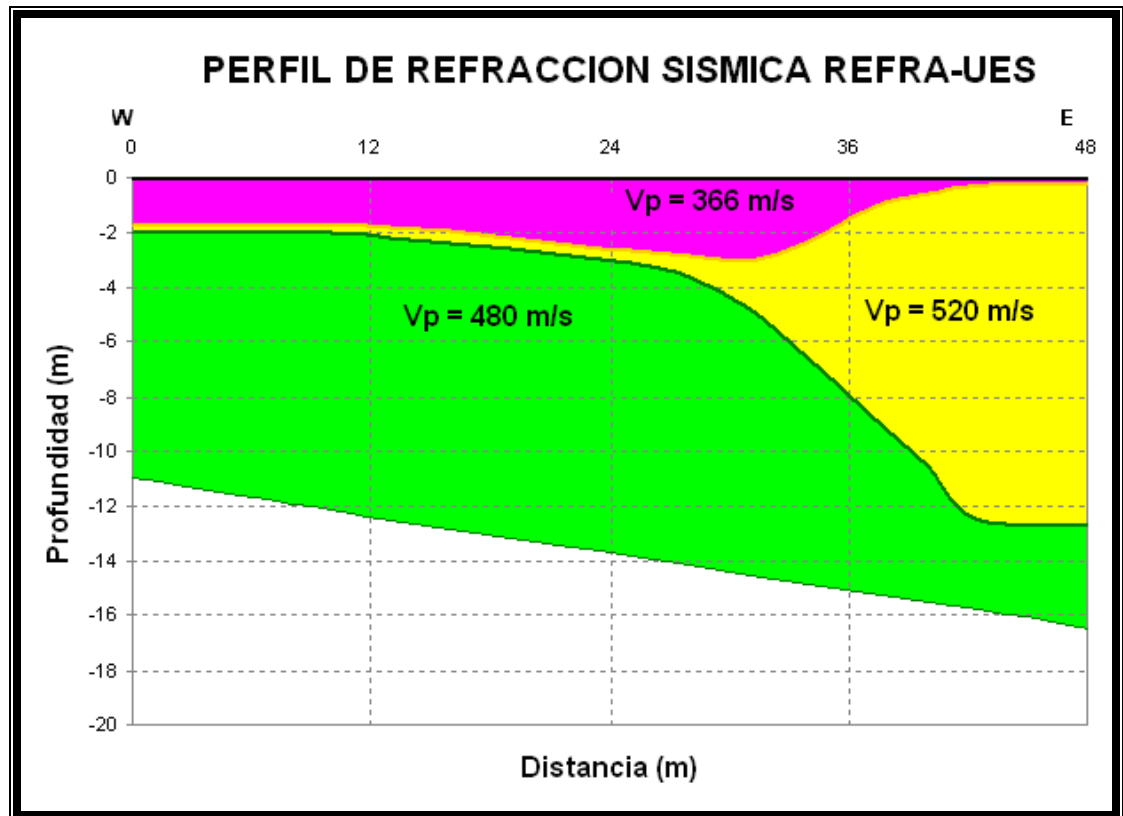


Figura 4.21 Perfil sísmico línea LR-01, perfil A-B.<sup>6</sup>

En la tabla 4.08 se presenta un resumen los resultados obtenidos.

PERFIL  LINEA	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3	
	Profundidad (m)	Vp (m/s)	Profundidad (m)	Vp (m/s)	Profundidad (m)	Vp (m/s)
LR – 01	0 – 1.5	366	1.5 – 6.5	520	6.5-13.5	480

\*: Valor de profundidad media, relativo al terreno natural.

\*\*\*: Valor máximo de sondeo; el estrato puede ser de mayor potencia

Tabla 4.08. Resultados de refracción sísmica. Los valores de profundidad presentada en esta tabla son valores promedio. Los valores de profundidad presentada para el último estrato es el máximo valor de obtenido en la línea de inspección por refracción.<sup>6</sup>



#### **4.2.5 EVALUACION DE RESULTADOS.**

##### **4.2.5.1 ESTUDIO DE SUELOS REALIZADO POR LA EMPRESA F.C. S.A. DE C.V.**

Este estudio fue solicitado por los estudiantes que realizan el trabajo de graduación “APLICACIÓN DEL MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P”, con el objetivo de determinar las condiciones del sub-suelo y las características tanto físicas como mecánicas de los estratos detectados en el Parqueo Norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura. El informe fue presentado el 10 de Mayo de 2007.

El estudio consistió en dos (2) sondeos exploratorios con equipo de penetración estándar (S.P.T.), distribuidos según se muestra en la figura 4.22. La máxima profundidad explorada fue de 10.0 metros (ver fotografías 4.09, 4.10 y 4.11)

Como se describe en el informe, se realizaron ensayos de laboratorio para la determinación del contenido de humedad en el laboratorio, descripción de suelos con procedimiento visual-manual y clasificación de suelos para propósitos de ingeniería.

Los materiales encontrados fueron arena limosa (SM) y limo arenoso (ML). En el sondeo 2, ubicado en el extremo oriente del sitio, se encontraron estratos contaminados con orgánicos desde la superficie hasta una profundidad de 6.5 metros.

Al estudiar los resultados obtenidos durante la exploración del sub-suelo, los datos del análisis de las muestras en el Laboratorio y la información de la inspección de campo

realizada durante el proceso de sondeo, se ha podido observar los siguientes puntos importantes:

- La estratigrafía del lugar presenta características poco coherentes. En términos generales, se hace notar dos situaciones totalmente disímiles, pues mientras que el Sondeo No 1 se han detectado “suelos naturales”, en el Sondeo No 2 hay al menos 6.5 metros de relleno hecho con suelos se desecho sin una adecuada compactación (ver figura 4.23).

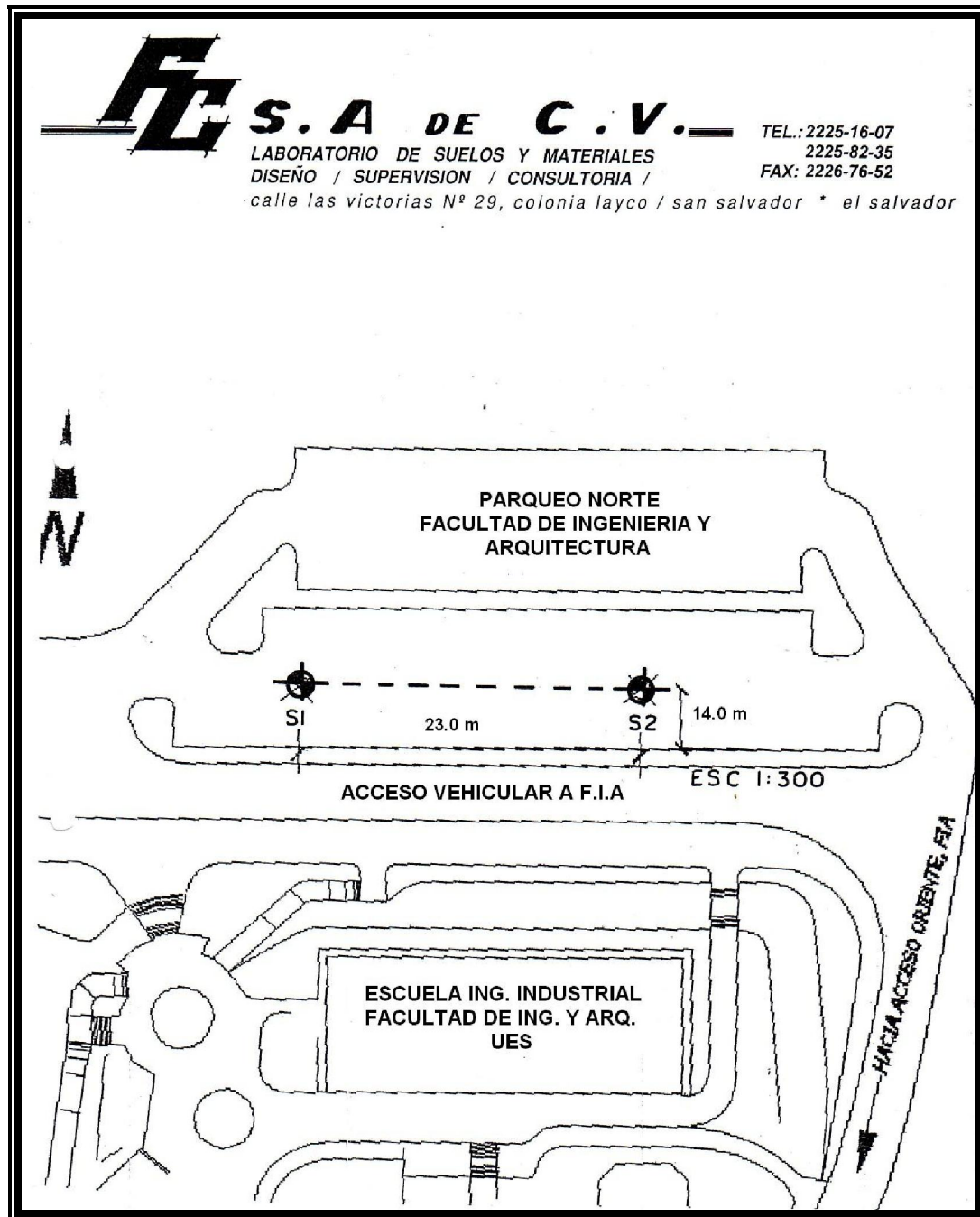


Figura 4.22: Esquema de ubicación de los dos (2) sondeos con equipo de penetración estándar en el Parqueo Norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, UES.<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Ing. Francés, Ignacio (2007): "Estudio de Suelos en Parqueo Norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura", Realizado por F.C. S.A, de C.V, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.



Fotografía 4.09. Desarrollo de dos sondeos con equipo de penetración estándar en el parqueo norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, U.E.S.



Fotografía 4.10. Muestras de suelo obtenidas de los dos sondeos realizados con el equipo de penetración estándar en el parqueo norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, U.E.S.



Fotografía 4.11. Proceso de preservación de muestras de suelo en recipientes herméticos (bolsas plásticas) para su transporte.

- Los contenidos naturales de humedad del sub-suelo, en la zona estudiada, varían entre 9.7 y 39.5 por ciento. Dichas humedad se encuentran dentro de lo que se podría considerarse como normales en el sondeo No 1 y altos, para el tipo de suelo detectado en el sondeo No 2. Los contenidos de humedad promedio oscilan entre 17.7 y 26.3 %.
- Existe en el área explorada una zona en estado suelto con baja capacidad de carga, además de un estrato sub-superficial contaminado con orgánicos (ver Tablas 4.09 y 4.10).





**S.A. DE C.V.**

LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES

DISEÑO / SUPERVISION / CONSULTORIA /

calle las victorias N° 29, colonia layco / san salvador \* el salvador

TEL.: 2225-16-07

2225-82-35

FAX: 2226-76-52

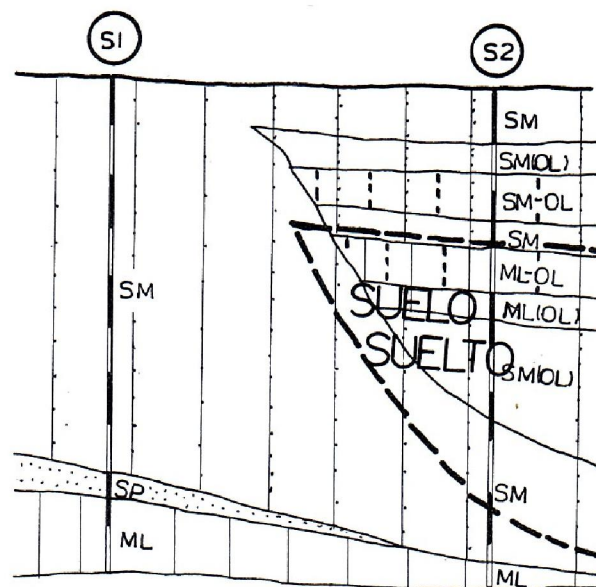


Figura 4.23 Perfil estratigráfico de los materiales detectados en los dos sondeos realizados con la prueba de penetración estándar.<sup>29</sup>

NUMERO DE SONDEO	Profundidad del estrato contaminado con orgánicos		Profundidad del estrato suelto	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior
1	----	----	0-9.5	→
2	0-1.0	0-6.5	0-3.0	0-8.5

Tabla 4.09 Cuadro resumen de la cuantificación y ubicación del estrato contaminado con orgánico y del estrato suelto.<sup>29</sup>

Profundidad (m)	SONDEO S1		SONDEO S2	
	Valores de Golpes "N"	Valores de Humedad (w%)	Valores de Golpes "N"	Valores de Humedad (w%)
0.5	48	10.5	42	14.0
1.0	36	14.1	35	15.9
1.5	19	16.7	19	23.2
2.0	24	15.0	23	22.1
2.5	23	15.1	15	24.1
3.0	30	15.1	14	26.0
3.5	30	14.5	6	28.6
4.0	42	14.9	5	32.1
4.5	45	15.7	5	31.3
5.0	54	16.7	8	39.5
5.5	30	9.7	8	24.6
6.0	26	20.1	9	27.8
6.5	25	20.8	10	27.3
7.0	31	21.1	8	25.9
7.5	23	28.6	8	27.2
8.0	49	23.8	6	27.4
8.5	31	11.8	10	25.2
9.0	12	23.4	20	24.3
9.5	11	20.1	18	29.3
10.0	10	25.7	53	29.3

Tabla 4.10. Cuadro resumen de los valores de "N" no corregidos obtenidos de la Prueba de Penetración Estándar en los dos sondeos realizados.<sup>29</sup>

- No se detectó en ninguna de las dos perforaciones efectuadas el nivel freático o aguas retenidas superficialmente.
- Se realizó la simplificación de resultados de S.P.T. Método Kobayashi – Obayashi. Ver tablas 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14.

Intervalo (m)	Clasificación SUCS	Símbolo Simplificación	FTS	Simplificación según Tipo de Suelo
0.0 – 0.5	SM	LS	1.00	LS
0.5 – 1.0	SM	LS	1.00	
1.0 – 1.5	SM	LS	1.00	
1.5 – 2.0	SM	LS	1.00	
2.0 – 2.5	SM	LS	1.00	
2.5 – 3.0	SM	LS	1.00	
3.0 – 3.5	SM	LS	1.00	
3.5 – 4.0	SM	LS	1.00	
4.0 – 4.5	SM	LS	1.00	
4.5 – 5.0	SM	LS	1.00	
5.0 – 5.5	SM	LS	1.00	
5.5 – 6.0	SM	LS	1.00	
6.0 – 6.5	SM	LS	1.00	
6.5 – 7.0	SM	LS	1.00	
7.0 – 7.5	SM	LS	1.00	
7.5 – 8.0	SM	LS	1.00	
8.0 – 8.5	SP	SS	1.00	
8.5 – 9.0	ML	SL	0.67	SL
9.0 – 9.5	ML	SL	0.67	
9.5 – 10.0	ML	SL	0.67	

Tabla 4.11. Cuadro resumen de la simplificación de resultados del sondeo S-1 por Método Kobayashi – Obayashi, según el Tipo de Suelo.<sup>29</sup>



Intervalos (m)	Clasificación SUCS	Símbolo Simplificación	FTS	Simplificación según Tipo de Suelo
0.0 – 0.5	SM	LS	1.00	LS
0.5 – 1.0	SM	LS	1.00	
1.0 – 1.5	SM-OL	CC	0.00	CC
1.5 – 2.0	SM-OL	CC	0.00	
2.0 – 2.5	SM-OL	CC	0.00	
2.5 – 3.0	SM	LS	1.00	LS
3.0 – 3.5	ML-OL	CC	0.00	CC
3.5 – 4.0	ML-OL	CC	0.00	
4.0 – 4.5	ML-OL	CC	0.00	
4.5 – 5.0	SM-OL	CC	0.00	
5.0 – 5.5	SM-OL	CC	0.00	
5.5 – 6.0	SM-OL	CC	0.00	
6.0 – 6.5	SM-OL	CC	0.00	
6.5 – 7.0	SM	LS	1.00	
7.0 – 7.5	SM	LS	1.00	LS
7.5 – 8.0	SM	LS	1.00	
8.0 – 8.5	SM	LS	1.00	
8.5 – 9.0	SM	LS	1.00	
9.0 – 9.5	SM	LS	1.00	
9.5 – 10.0	ML	SL	0.67	SL

Tabla 4.12. Cuadro resumen de la simplificación de resultados del sondeo S-2 por Método Kobayashi – Obayashi, según el Tipo de Suelo.<sup>29</sup>

Intervalo (m)	"N"	Consistencia ó Compacidad	Diferencia Aritmética	Diferencia Aritmética Absoluta (ΔN)	Media Aritmética (ΔN)	Diferencia aritmética menos Media Aritmética	Valor Absoluto Diferencia Aritmética menos Media Aritmética	Valor Absoluto Diferencia Aritmética menos Media Aritmética elevado al cuadrado	Simplificación Tomando en Cuenta Valores de “N”	Simplificación Tomando en Cuenta Tipo de Suelo.						
0.0 – 0.5	48	Compacto							34	LS						
0.5 – 1.0	36	Compacto	12	12	9.16	2.84	2.84	8.07								
1.0 – 1.5	19	Semi-compacto	17	17	9.16	7.84	7.84	61.47								
1.5 – 2.0	24	Semi-compacto	-5	5	9.16	-4.16	4.16	17.31	27		SL					
2.0 – 2.5	23	Semi-compacto	1	1	9.16	-8.16	8.16	66.59								
2.5 – 3.0	30	Semi-compacto	-7	7	9.16	-2.16	2.16	4.67								
3.0 – 3.5	30	Semi-compacto	0	0	9.16	-9.16	9.16	83.91	42			SL				
3.5 – 4.0	42	Compacto	-12	12	9.16	2.84	2.84	8.07								
4.0 – 4.5	45	Compacto	-3	3	9.16	-6.16	6.16	37.95	50				SL			
4.5 – 5.0	54	Compacto	-9	9	9.16	-0.16	0.16	0.03								
5.0 – 5.5	30	Semi-compacto	24	24	9.16	14.84	14.84	220.23	30					SL		
5.5 – 6.0	26	Semi-compacto	4	4	9.16	-5.16	5.16	26.63								
6.0 – 6.5	25	Semi-compacto	1	1	9.16	-8.16	8.16	66.59	26						SL	
6.5 – 7.0	31	Compacto	-6	6	9.16	-3.16	3.16	9.99								
7.0 – 7.5	23	Semi-compacto	8	8	9.16	-1.16	1.16	1.35								
7.5 – 8.0	49	Compacto	-26	26	9.16	16.84	16.84	283.59	31							SL
8.0 – 8.5	31	Compacto	18	18	9.16	8.84	8.84	78.15								
8.5 – 9.0	12	Semi-suelto	19	19	9.16	9.84	9.84	96.83	11	SL						
9.0 – 9.5	11	Semi-suelto	1	1	9.16	-8.16	8.16	66.59								
9.5 – 10.0	10	Suelto	1	1	9.16	-8.16	8.16	66.59								
			Σ(ΔN)	174			Σ	1204.53								
			F	19			F	19								
			ΔN= Σ(ΔN)/ F	9.16			Σ/ F	63.40								
							σ = √( Σ/ F)	7.96								

Tabla 4.13. Cuadro resumen de la simplificación de resultados del sondeo S-1 por Método Kobayashi – Obayashi, según Valores de "N"

Intervalo (m)	"N"	Consistencia ó Compacidad	Diferencia Aritmética	Diferencia Aritmética Absoluta ( $\Delta N$ )	Media Aritmética ( $\Delta N$ )	Diferencia aritmética menos Media Aritmética	Valor Absoluto Diferencia Aritmética menos Media Aritmética	Valor Absoluto Diferencia Aritmética menos Media Aritmética elevado al cuadrado	Simplificación Tomando en Cuenta Valores de "N"	Simplificación Tomando en Cuenta Tipo de Suelo.
0.0 – 0.5	42	Compacto								LS
0.5 – 1.0	35	Compacto	7	7	5.53	1,47	1,47	2,16		
1.0 – 1.5	19	Semi-suelto	16	16	5.53	10,47	10,47	109,62	32	CC
1.5 – 2.0	23	Semi-compacto	-4	4	5.53	-1,53	1,53	2,34	23	
2.0 – 2.5	15	Semi-suelto	8	8	5.53	2,47	2,47	6,10	15	
2.5 – 3.0	14	Semi-suelto	1	1	5.53	-4,53	4,53	20,52	14	LS
3.0 – 3.5	6	Suelto	8	8	5.53	2,47	2,47	6,10	6	
3.5 – 4.0	5	Suelto	1	1	5.53	-4,53	4,53	20,52	8	
4.0 – 4.5	5	Suelto	0	0	5.53	-5,53	5,53	30,58		
4.5 – 5.0	8	Suelto	-3	3	5.53	-2,53	2,53	6,40		
5.0 – 5.5	8	Suelto	0	0	5.53	-5,53	5,53	30,58		
5.5 – 6.0	9	Suelto	-1	1	5.53	-4,53	4,53	20,52		
6.0 – 6.5	10	Suelto	-1	1	5.53	-4,53	4,53	20,52		CC
6.5 – 7.0	8	Suelto	2	2	5.53	-3,53	3,53	12,46		
7.0 – 7.5	8	Suelto	0	0	5.53	-5,53	5,53	30,58		
7.5 – 8.0	6	Suelto	2	2	5.53	-3,53	3,53	12,46		
8.0 – 8.5	10	Suelto	-4	4	5.53	-1,53	1,53	2,34		
8.5 – 9.0	20	Semi-suelto	-10	10	5.53	4,47	4,47	19,98	20	
9.0 – 9.5	18	Semi-suelto	2	2	5.53	-3,53	3,53	12,46	18	LS
9.5 – 10.0	53	Muy compacto	-35	35	5.53	29,47	29,47	868,48	53	SL
				$\Sigma(\Delta N)$	105.00			$\Sigma$	1234.74	
				F	19.00			F	19	
				$\Delta N$	5.53			$\Sigma / F$	64.99	
								$\Sigma = \sqrt{(\Sigma / F)}$	8.06	

Tabla 4.14. Cuadro resumen de la simplificación de resultados del sondeo S-2 por Método Kobayashi – Obayashi, según Valores de "N".

- Según los resultados de la simplificación de S.P.T. por el método Kobayashi – Obayashi, en el sondeo S-1 se obtuvieron ocho estratos con diferentes valores promedio de “N”. El primer estrato alcanza una profundidad de 1.50 m y presenta un valor promedio de N igual a 34 golpes. El segundo estrato alcanza una profundidad de 3.5 m y presenta un valor promedio de N igual a 27 golpes. El tercer estrato alcanza una profundidad de 4.0 m y presenta un valor promedio de N igual a 42 golpes. El cuarto estrato alcanza una profundidad de 5.0 m y presenta un valor promedio de N igual a 50 golpes. El quinto estrato alcanza una profundidad de 5.5 m y presenta un valor promedio de N igual a 30 golpes. El sexto estrato alcanza una profundidad de 7.5 m y presenta un valor promedio de N igual a 26 golpes. El séptimo estrato alcanza una profundidad de 9.0 m y presenta un valor promedio de N igual a 31 golpes. El último estrato detectado alcanza una profundidad de 10.0 m y presenta un valor promedio de N igual a 11 golpes. El primer estrato se relaciona con el material que presenta una velocidad de ondas P de 366 m/s y alcanza una profundidad de 1.5 m, los estratos 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se relacionan con el material que presenta una velocidad de ondas P de 480 m/s que alcanza una profundidad de 13.5 m.
- Según los resultados de la simplificación de S.P.T. por el método Kobayashi – Obayashi, en el sondeo S-2 se obtuvieron nueve estratos con diferentes valores promedio de “N”. El primer estrato alcanza una profundidad de 1.50 m y presenta un valor promedio de N igual a 32 golpes. El segundo estrato alcanza una profundidad de 2.0 m y presenta un valor promedio de N igual a

23 golpes. El tercer estrato alcanza una profundidad de 2.5 m y presenta un valor promedio de N igual a 15 golpes. El cuarto estrato alcanza una profundidad de 3.0 m y presenta un valor promedio de N igual a 14 golpes. El quinto estrato alcanza una profundidad de 3.5 m y presenta un valor promedio de N igual a 6 golpes. El sexto estrato alcanza una profundidad de 8.5 m y presenta un valor promedio de N igual a 8 golpes. El séptimo estrato alcanza una profundidad de 9.0 m y presenta un valor promedio de N igual a 20 golpes. El octavo estrato alcanza una profundidad de 9.5 m y presenta un valor promedio de N igual a 18 golpes. El último estrato detectado alcanza una profundidad de 10.0 m y presenta un valor promedio de N igual a 53 golpes. Los estratos 1, 2, 3 y 4 se relacionan con el material que presenta una velocidad de ondas P de 366 m/s y el cual alcanza una profundidad de 1.5 m. Los estratos 5 y 6 se relacionan con el material que presenta una velocidad de ondas P de 520 m/s y el cual alcanza una profundidad de 6.5 m. Los estratos 7, 8 y 9 se relacionan con el material que presenta una velocidad de ondas P de 480 m/s y el cual alcanza una profundidad de 13.5 m.

## **RESULTADOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA.**

Del perfil sísmico obtenido claramente señala la existencia de tres estratos de material:

- El primero, desde la superficie hasta una profundidad promedio de 1.5 metros, muestra una velocidad de propagación de ondas P de 366 m/s, característico de materiales intemperizados o de sedimentos no consolidados. Con relación a la geología, se conoce que este material es proveniente de la

Formación San Salvador (miembro S4), el cual se refiere a piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas, conocidas como “Tierra Blanca”. Esto corresponde a suelo areno-limoso (SM) en estado compacto ( $N > 30$  golpes) reportado en el estudio de suelos y los cuales predominan en los sondeos S-1 y S-2 hasta una profundidad de 1.0 metro.

- El segundo estrato, subyaciendo al anterior, hasta una profundidad promedio de 6.5 metros, muestra una velocidad de propagación de ondas P de 520 m/s, característico de materiales intemperizados, o de sedimentos no consolidados. Con relación a la geología, se conoce que este material es proveniente de la Formación San Salvador (miembro S4), el cual se refiere a piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas, conocidas como “Tierra Blanca”. Esto corresponde, según el estudio de suelos, a materiales areno-limosos (SM) y limo-arenosos (ML) en estado suelto ( $N < 10$  golpes) con presencia de material orgánico (OL) y altos contenidos de humedad y el cual predomina en el sondeo S-2 hasta una profundidad aproximada de 8.5 metros. Estos materiales se consideran como suelos no-naturales o de relleno.
- El tercer estrato, subyaciendo al anterior, hasta una profundidad de 13.5 metros, muestra una velocidad de propagación de ondas P de 480 m/s característico de materiales intemperizados ó grava o arena seca o de sedimentos no consolidados. Con relación a la geología, se conoce que este material es proveniente de la Formación San Salvador (miembro S4), que

corresponde a piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas, conocidas como “Tierra Blanca”. Esto corresponde, según el estudio de suelos, a materiales areno-limosos (SM) y limo-arenosos (ML) y el cual predomina en los sondeos S-1 y S-2 hasta una profundidad aproximada de 10.0 metros.

#### **4.2.6 CONCLUSIONES.**

- La profundidad promedio de investigación alcanzada en el estudio de refracción sísmica es de 13.5 metros.
- A través del perfil sísmico obtenido se determinaron tres capas de materiales consistentes en limo o arenas flojas hasta una profundidad media de 1.5 metros, sedimentos no consolidados hasta una profundidad media de 6.5 metros y limo o arenas sueltas a mayor profundidad.
- A la profundidad detectada no se identificó nivel de lecho rocoso.
- Según el Estudio de Suelo, en el sondeo S-1 se han detectado “suelos naturales” mientras que en el sondeo S-2 hay al menos 6.5 metros de relleno hecho con suelos de desecho sin una adecuada compactación.
- Los contenidos naturales de humedad del sub-suelo, en la zona estudiada, varían entre 9.7 y 39.5 por ciento. Dichas humedad se encuentran dentro de lo que se podría considerarse como “normales” en el sondeo S-1 y “altos” para el tipo de suelo detectado en el sondeo S-2.

- Existe en el área explorada una zona en estado suelto con baja capacidad de carga (sondeo S-2, entre 3.0 y 8.5 m de profundidad), además de un estrato sub-superficial contaminado con orgánicos (sondeo S-2, entre 1.0 y 6.5 m de profundidad).
- No se detectó en ninguna de las dos perforaciones efectuadas el nivel freático o aguas retenidas superficialmente.
- Según los resultados de la simplificación S.P.T. por el método Kobayashi–Obayashi en el sondeo S-1 el primer estrato se relaciona con el material que presenta una velocidad de ondas P de 366 m/s que alcanza una profundidad de 1.5 m. Los estratos 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se relacionan con el material que presenta una velocidad de ondas P de 480 m/s y el cual alcanza una profundidad de 13.5 m.
- Según los resultados de la simplificación S.P.T. por el método Kobayashi–Obayashi en el sondeo S-2 los estratos 1, 2, 3 y 4 se relacionan con el material que presenta una velocidad de ondas P de 366 m/s y que alcanza una profundidad de 1.5 m. Los estratos 5 y 6 se relacionan con el material que presenta una velocidad de ondas P de 520 m/s que alcanza una profundidad de 6.5 m. Los estratos 7, 8 y 9 se relacionan con el material que presenta una velocidad de ondas P de 480 m/s y el cual alcanza una profundidad de 13.5 m.
- A pesar que la ecuación 3.35 muestra la existencia de una relación directamente proporcional entre la velocidad de ondas P y la compacidad ó



consistencia del suelo (valores de N de S.P.T.), se observa en el sondeo S-2 que los valores de N disminuyen con la profundidad mientras que la velocidad de ondas P presenta un comportamiento inverso. Esto podría relacionarse al contenido de humedad, el cual presenta un aumento en su valor conforme aumenta la profundidad de la inspección (ver Tabla 4.10).

#### **4.3 METODOLOGIA PARA LA CARACTERIZACION DE LOS SUELOS DEL MUNICIPIO DE SAN SALVADOR Y ZONAS ALEDAÑAS.**

En este apartado se explicará, por medio de un conjunto de pasos consecutivos, la metodología utilizada para la presentación y análisis de la información disponible sobre estudios de refracción sísmica realizados en el municipio de San Salvador y zonas aledañas, los cuales fueron recabados en el transcurso de elaboración de este trabajo de graduación.

Para una mayor claridad del proceso, se enumeran las actividades necesarias para obtener la caracterización de los suelos del municipio de San Salvador y zonas aledañas.

- a) Como primer paso, se presentará un resumen de los resultados de todos los estudios de refracción sísmica puestos a disposición para el desarrollo de este capítulo. Esto se hará con el fin de realizar un exhaustivo inventario para la detección de los puntos más relevantes de dichos informes y de esta forma identificar el grado de extensión que presentan algunos estudios respecto a otros que hayan sido realizados en lugares muy próximos o en sitios distantes pero con presencia de materiales similares. Debido a la confidencialidad de la información proveída y su antigüedad, algunos de los estudios geofísicos no cuentan con la evaluación de resultados de las velocidades de ondas P obtenidas, siendo una de las razones del inventario completar aquellos estudios con ayuda de otros que hayan sido realizados en lugares cercanos al sitio de interés para lograr que toda la información tenga un nivel mínimo de

contenido que permita la evaluación de la información de una forma más general.

- b) Como segundo paso, se procederá a agrupar los estudios de refracción sísmica en función a su cercanía geográfica, lo que permitirá caracterizar los suelos presentes en aquellas zonas donde se concentran la mayor cantidad de estudios. Por otro lado, en aquellas zonas donde únicamente se ubican muy pocos estudios de refracción sísmica, la información obtenida se utilizará únicamente para verificar la presencia de aquellos materiales indicados por mapas geológicos o estudios de suelo que estén disponibles en el proceso de análisis, sin llegar a profundizar demasiado en las características de los materiales detectados. Como herramienta básica se utilizará el Mapa Geológico desarrollado por la Misión Alemana (Esc. 1:100,000), específicamente donde se ubica el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), con el fin de proveer una mejor referencia en la ubicación de los lugares en estudio (ver figuras 4.24; fotografías 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16; y tabla 4.15). La limitante de este mapa es la escala. debido a que no es la adecuada para las longitudes de las líneas de refracción sísmica que se presentan en los estudios de refracción sísmica ( $L_{\text{máx.}} = 72.0 \text{ m}$ ). Adicionalmente, se menciona que algunos de los sitios donde se han realizado estudios de refracción sísmica no ha sido posible determinar su ubicación exacta, por lo tanto, éstos han sido ubicados de una manera aproximada procurando que los resultados de refracción sísmica concuerden

con los materiales mencionados en la geología de la zonas donde se sabe que se encuentras dicho sitios.

c) Como tercer paso, se procederá a recabar información geológica del municipio de San Salvador y zonas aledañas, con el fin de crear el ámbito requerido para proveer la información básica y comprender mejor el origen y la secuencia estratigráfica de los materiales detectados en las diferentes zonas definidas en el paso anterior. No es intención de los autores describir la historia geológica de San Salvador; pero sí se presentarán aquellos elementos que expliquen mejor la secuencia estratigráfica de los materiales predominantes en el municipio de San Salvador. La razón en la utilización de la información geológica es debido a su facilidad de obtención, además de observarse la particularidad de que en la mayoría de estudios de refracción sísmica no cuentan con información proveniente de estudios de suelos que identifiquen de una forma más clara los materiales detectados y permita la verificación de resultados obtenidos por refracción sísmica para realizar la caracterización de materiales con un rango de velocidades de ondas P determinado.

d) Como cuarto paso, se presentará un conjunto de tablas de cada zona definida en el paso dos, en la cual se presente la ubicación de los lugares donde han sido realizados los estudios de refracción sísmica, los valores puntuales de velocidad de ondas P, la profundidad promedio desde la cual se detecta cada material, la identificación de las unidades geológicas (definidas en el mapa Geológico de El Salvador) que se encontraron en cada ubicación y los

resultados específicos obtenidos de cada estudio de refracción sísmica. Esto se hace con el fin de poder facilitar la caracterización de los suelos encontrados en las diferentes áreas del municipio de San Salvador con un rango estimado de velocidades de ondas P y observar los aspectos geotécnicos mencionados en el capítulo dos de este trabajo de graduación relacionado con los tipos de suelos predominantes y los espesores de tierra blanca.

#### **DESCRIPCION DE ESTUDIOS DE REFRACCION SISMICA REALIZADO EN EL MUNICIPIO DE SAN SALVADOR Y ZONAS ALEDAÑAS.**

- **Estudio de refracción sísmica realizado en Final Paseo General Escalón, Municipio de San Salvador (ES2).**

Este estudio se realizó en dos etapas. La diferencia entre ambas consiste en el momento en que fueron ejecutadas (antes ó después de los trabajos de terracería).

En la primera etapa, el estudio de refracción sísmica consistió en dos líneas sísmicas, cuyo objetivo fue determinar dos perfiles sísmicos del terreno en función a sus características de propagación de onda P por el método de refracción sísmica, con profundidad de investigación variable, que servirá para la definición de los puntos más idóneos y el nivel de referencia donde se realizarán los sondeos mecánicos (de tipo rotativo o por percusión) para la determinación de las condiciones del sub-suelo y las características físicas y mecánicas de los estratos detectados.

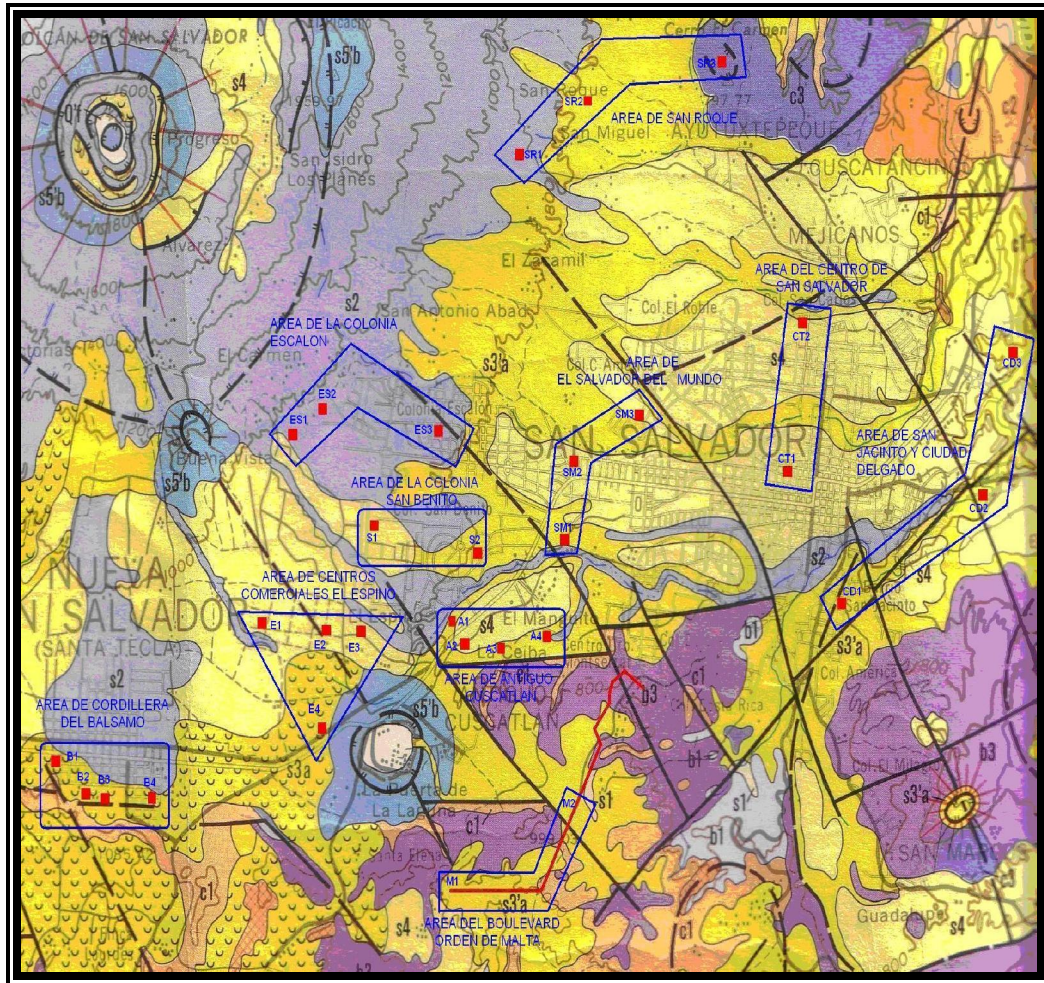


Figura 4.24: Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el Municipio de San Salvador y Zonas Aledañas en el Mapa Geológico de El Salvador.<sup>28</sup>

DESCRIPCION	NOMENCLATURA
<b>Área de Cordillera del Bálsamo</b>	<b>B1 hasta B4</b>
Pinares de Suiza	B1
Tierra Verde	B2
Colonia Paraíso	B3
Colonia Las Colinas	B4
<b>Área de Centros Comerciales El Espino.</b>	<b>E1 hasta E4</b>
Boulevard Merliot	E1
Finca el Espino Anexo a Escuela Militar	E2
Avenida Jerusalén	E3
La gran Vía	E4
<b>Área de Colonia Escalón</b>	<b>ES1 hasta ES3</b>
Escalón 1	ES1
Final Paseo General Escalón	ES2
Calle del Mirador	ES3
<b>Área de Colonia San Benito</b>	<b>S1 hasta S2</b>
Colonia San Benito	S1
Zona Rosa	S2
<b>Área de Antiguo Cuscatlán</b>	<b>A1 hasta A4</b>
Casa Presidencial	A1
Hotel Siesta.	A2
UCA	A3
Terreno Aledaño Gevesa.	A4
<b>Área del Boulevard Orden de Malta.</b>	<b>M1 hasta M2</b>
Price-Mart	M1
Desvío a Huizúcar	M2
<b>Área del Monumento al Salvador del Mundo</b>	<b>SM1 hasta SM3</b>
Calle el Progreso	SM1
San José de la Montaña	SM2
Hotel Camino Real	SM3
<b>Área de San Roque.</b>	<b>SR1 hasta SR3</b>
Cantón San Ramón	SR1
Centro Recreativo de la PNC	SR2
Cantón el Carmen	SR3
<b>Área del Centro de San Salvador.</b>	<b>CT1 hasta CT2</b>
Palacio de los Deportes	CT1
UES	CT2
<b>Área de San Jacinto Y Ciudad Delgado</b>	<b>CD1 hasta CD3</b>
Hogar del Niño San Vicente de Paúl	CD1
Centro de Investigaciones Geotécnicas	CD2
Instituto Geográfico Nacional	CD3

Tabla 4.15. Nomenclatura utilizada para la identificación de los estudios de refracción sísmica realizados en el municipio de San Salvador y zonas aledañas<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Recopilación de estudios de refracción sísmica realizados en el municipio de San Salvador y zonas aledañas





Fotografía 4.12. Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área de San Jacinto y Ciudad Delgado (CD) y en el área del Centro de San Salvador (CT).

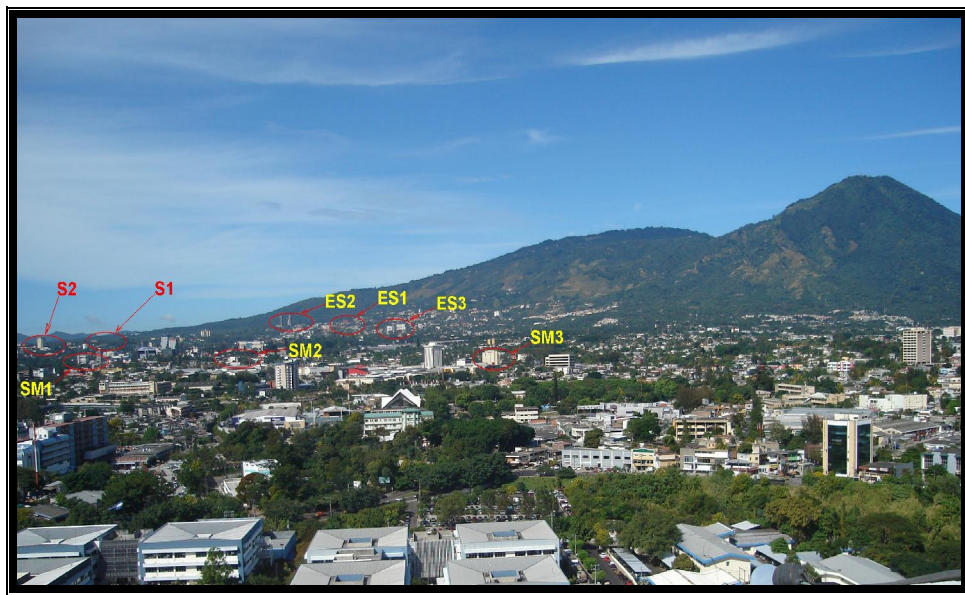


Fotografía 4.13. Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área de San Jacinto y Ciudad Delgado (CD) y en el área del Centro de San Salvador (CT).

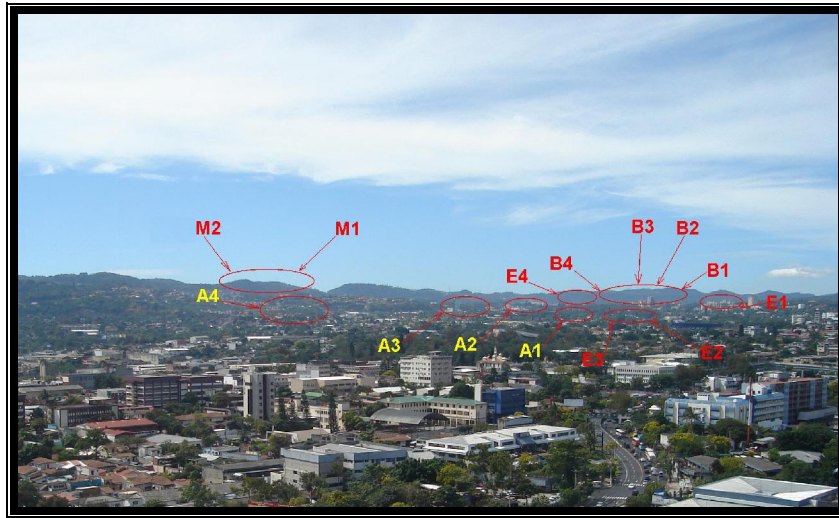




Fotografía 4.14 Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área del Centro de San Salvador (CT) y en el área de San Roque (SR).



Fotografía 4.15 Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área del Monumento Salvador al Mundo (SM), área de Colonia Escalón (ES) y en el área de Colonia San Benito (S).



Fotografía 4.16 Ubicación de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el área de Antiguo Cuscatlán (A); en el área del Boulevard Orden de Malta (M), en el área de Centros Comerciales El Espino (E); y área de Cordillera del Bálsamo (B).

Con los ensayos se logró obtener registros de velocidad de ondas sísmicas hasta una profundidad máxima de 19m. Específicamente, los resultados muestran la existencia de tres estratos en el subsuelo, el primero desde la superficie hasta una profundidad variable entre 0 y 4m que muestra velocidades de ondas sísmicas de 200 a 361 m/s que corresponderían a formaciones de tierra blanca (SM o ML) característica del AMSS. A continuación se tiene un estrato que presenta velocidades de onda P de 422 m/s y 433 m/s que alcanza entre los 7.5 a 15 metros y el cual consiste en suelos granulares arenosos – gravosos de compacidad semi-densa a densa. Y por último, subyacente al anterior, se identificó un tercer estrato, para el cual se registraron velocidades de ondas sísmicas de 556 m/s y 733 m/s y corresponderían a un suelo en estado más compacto o posiblemente a roca muy fracturada o intemperizada, extendiéndose por lo menos hasta una

profundidad de 19 metros (ver figura 4.25). No se registro nivel freático hasta la profundidad investigada. (Diciembre, 2006).



Figura 4.25. Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Final Paseo Gral. Escalón, San Salvador.<sup>30</sup>

En la segunda etapa, el estudio de refracción sísmica consistió en cinco líneas sísmicas, cuyo objetivo fue la determinación de los perfiles sísmicos del suelo en función a sus características de propagación de ondas compresivas (P), con profundidad de investigación variable, que servirá como complemento al estudio geotécnico previamente realizado.

Los resultados obtenidos muestran tres estratos de materiales, presentando el primer estrato velocidades de propagación de ondas P en el rango de 238 – 279 m/s el cual consiste en materiales sueltos no consolidados hasta una profundidad media de 2.9 metros que corresponde a arena mal graduada (SP) en estado suelto. El segundo estrato, con velocidades de propagación de ondas P en el rango de 322 – 430 m/s, consiste en materiales alterados e

intemperizados hasta una profundidad media de 9.2 metros los cuales corresponden a materiales tipo escoria volcánica con trazas, incrustaciones y rocas de diferentes tamaños. Finalmente, el tercer estrato, con velocidades de propagación de ondas P en el rango de 700 – 800 m/s, consiste en suelos que incluyen materiales tales como arenas, gravas y fragmentos de roca de diferentes tamaños a mayor profundidad. Este tipo de materiales no fueron detectados en el estudio de suelos debido a que la profundidad máxima de los sondeos fue 12.0 metros.

La máxima profundidad de penetración de los sondeos por refracción es aproximadamente de 20 metros, nivel al cual no se identificó lecho rocoso. Así mismo, el nivel freático no fue detectado. (Septiembre, 2007).

- **Estudio de refracción sísmica realizado en Calle del Mirador, Colonia Escalón, Municipio de San Salvador (ES3).**

El estudio de refracción sísmica consistió en tres líneas sísmicas, cuyo objetivo fue determinar tres perfiles sísmicos del terreno en función a sus características de propagación de onda P por el método de refracción sísmica, con profundidad de investigación variable, que servirá para la definición de los puntos más idóneos y el nivel de referencia donde se realizarán los sondeos mecánicos (de tipo rotativo o por percusión) para la determinación de las condiciones del sub-suelo y las características físicas y mecánicas de los estratos detectados.

Los resultados indicaron que los suelos superficiales van disminuyendo de espesor de Sur a Norte, variando su profundidad. En los resultados obtenidos se puede identificar un estrato superficial de bajas velocidades de ondas P (del orden de 350 - 450 m/s) que corresponde a un estrato de suelo intemperizado y de origen volcánico, formado por suelos arenosos y limosos de consistencia suelta a densa. Estos estratos se encuentran hasta profundidades que en promedio oscilan entre los 4 y 8 metros.

A continuación se detectó un segundo estrato de consistencia densa, que para la parte sur del sitio se obtuvieron velocidades de refracción de la onda P en el orden de 550 m/s (450-650) y el cual varía en profundidades promedios de 4 m hasta los 15m y corresponde a un material granular con bloques pequeños de roca. Para la parte norte del sitio, este segundo estrato tiene velocidades de 650 m/s, las cuales son representativas de gravas con una matriz de piedra bastante fisurada (material granular y bloques pequeños de roca) y el cual se encuentra en profundidades que inician en promedio a los de 7 m y continúan hasta 18 m (la cual es la máxima profundidad de medición en esta zona). Finalmente se detectó un tercer estrato (únicamente en la parte sur del sitio) el cual se aprecia a partir de una profundidad promedio de 15m con velocidades de ondas p, superiores a los 1000m/s. Estas velocidades corresponden a una matriz de roca fracturada o arenas mezcladas con rocas fragmentadas de alta densidad. Las mediciones muestran velocidades de hasta 1500 m/s a profundidades cercanas a las 24m (ver figura 4.26). Lo que indica que la tendencia es que a esa profundidad se está acercando al lecho rocoso denso (Marzo, 2006).





Figura 4.26. Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Calle del Mirador, Colonia Escalón, San Salvador.<sup>30</sup>

- **Estudios de refracción sísmica realizados en proyecto de Nueva Carretera Boulevard Diego de Holguín, entre municipios de San Salvador y Antiguo Cuscatlán.**

El objetivo de estos estudios fue determinar el perfil estratigráfico efectuando líneas sísmicas en los sectores donde se cimentarán las estructuras de puentes. Esta información ayudará a complementar la información del subsuelo obtenidos a partir del estudio geotécnico.

Se ejecutaron un total de nueve líneas sísmicas, dividiéndose en 4 zonas: Cercanías a Boulevard Merliot , Finca El Espino anexo a Escuela Militar, Avenida Jerusalén y Cercanías a Hotel Siesta.

**Evaluación de la Zona Boulevard Merliot, Municipio de Antiguo Cuscatlán (E1).**

El perfil 1 se encuentra ubicado en el Km 4+800 presenta un perfil estratigráfico que está constituido por tres estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda  $V_p = 208$  m/s, con una profundidad de 2.00 a 2.80 m denominándose tierra blanca; debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 1053 m/s, la profundidad del estrato es variable entre 20.00 a 22.00 m y se nombró como lava andesítica y basáltica fracturada. La última capa obtuvo una velocidad de onda  $V_p = 2121$  m/s y se denominó lava basáltica firme.

El perfil 2 se ubica en el Km 4+960, en la cual se encontró tres estratos. La primera capa alcanza una profundidad espesor variable de 1.00 a 1.50 m presentando una velocidad de onda  $V_p = 183$  m/s denominándose tierra blanca. A continuación se presenta una capa con velocidad  $V_p = 868$  m/s, que alcanza una profundidad variable entre 13.00 a 20.00 m y se denominó lava andesítica y basáltica muy fracturada. La tercera capa presentó una velocidad de onda  $V_p = 1629$  m/s denominándose lava basáltica.

El perfil 3 está ubicado en el Km 5+400, donde se encontraron tres estratos. La primera capa alcanza una profundidad variable entre 1.00 y 2.00 m presenta una velocidad de onda  $V_p = 303$  m/s llamándola tierra blanca. Seguidamente se encontró una capa que alcanza una profundidad entre 16.5 y 20.00 m que presenta una velocidad  $V_p = 1376$  m/s, y corresponde a un

estrato de lava andesítica y basáltica muy fracturada. Finalmente se tiene un estrato con velocidad  $V_p = 1832$  m/s que se denominó como lava basáltica.

**Evaluación de la Zona Finca El Espino anexo a Escuela Militar, municipio de Antigua Cuscatlán (E2).**

Esta zona fue evaluada con una línea sísmica, a la altura del Km 5+851 donde se proyectará un puente. El perfil 4 presenta 3 estratos, el primero tiene una profundidad variable entre 0.50m y 9.00 m y su velocidad de onda  $V_p$  es de 403 m/s, al que se denominó como tierra blanca; el segundo estrato presenta  $V_p = 634$  m/s y una profundidad variable entre 20.00 m y 34.00 m al que se denominó como una mezcla de arena limosa, gravas y bombas de lava. Finalmente el último estrato muestra una velocidad de onda  $V_p = 1250$  m/s donde se pudo establecer que corresponde a lava basáltica fracturada (ver figuras 4.27 y 4.28).

**Evaluación de la Zona Avenida Jerusalén, municipio de San Salvador (E3).**

El perfil 5 ubicado en el Km 6+340, muestra un perfil estratigráfico que está formado por tres estratos, el primero con una velocidad de onda  $V_p = 312$  m/s tiene una profundidad variable entre 0.50 y 4.50 m denominándose tierra blanca; debajo de éste se halló un segundo estrato con una velocidad de 499 m/s que alcanza una profundidad variable entre 6.50 y 15.00 m y se denominó como mezcla de arena, grava y roca fracturada. La última capa



obtuvo una velocidad de onda  $V_p = 1345$  m/s, donde se identificó como roca basáltica fracturada.

El perfil 6 se ubica en el Km 6+350, se encontró tres estratos. La primera capa presenta una profundidad variable entre 1.00 y 2.00 m con una velocidad de onda  $V_p = 198$  m/s por lo cual se denominó al estrato como tierra blanca. Luego se encontró una capa con velocidad  $V_p = 371$  m/s, alcanzando una profundidad variable entre 6.50 y 11.00 m y se llamó tierra blanca compacta. La tercera capa presentó una velocidad de onda  $V_p = 606$  m/s siendo un estrato compuesto por una mezcla de arena, grava y roca fracturada.

**Evaluación de la Zona Cercana a Hotel Siesta, municipio de Antigua Cuscatlán (A2).**

El perfil 7 está ubicado en el Km 7+500, que presenta un perfil estratigráfico que está constituido por tres estratos, el primero con velocidad de onda  $V_p = 251$  m/s, alcanza una profundidad que varía de 0.50 a 4.00 m designándose como tierra blanca. A continuación se encontró una capa con velocidad  $V_p = 373$  m/s, de profundidad variable entre 7.00 a 11.00 m que sería escoria volcánica. La tercera capa presentó una velocidad de onda  $V_p = 1007$  m/s, siendo lava basáltica fracturada.

El perfil 8 se encuentra ubicado en el Km 7+580, donde se encontraron tres estratos. La primera capa alcanza una profundidad de 2.00 m, con velocidad de onda  $V_p = 352$  m/s y fue denominada como tierra blanca. Seguidamente se halló una capa que alcanza una profundidad de 9.00 m y presenta una velocidad  $V_p = 1309$  m/s, siendo un estrato de lava basáltica fragmentada,

para concluir en el último estrato que tiene velocidad  $V_p = 1930$  m/s siendo lava basáltica.

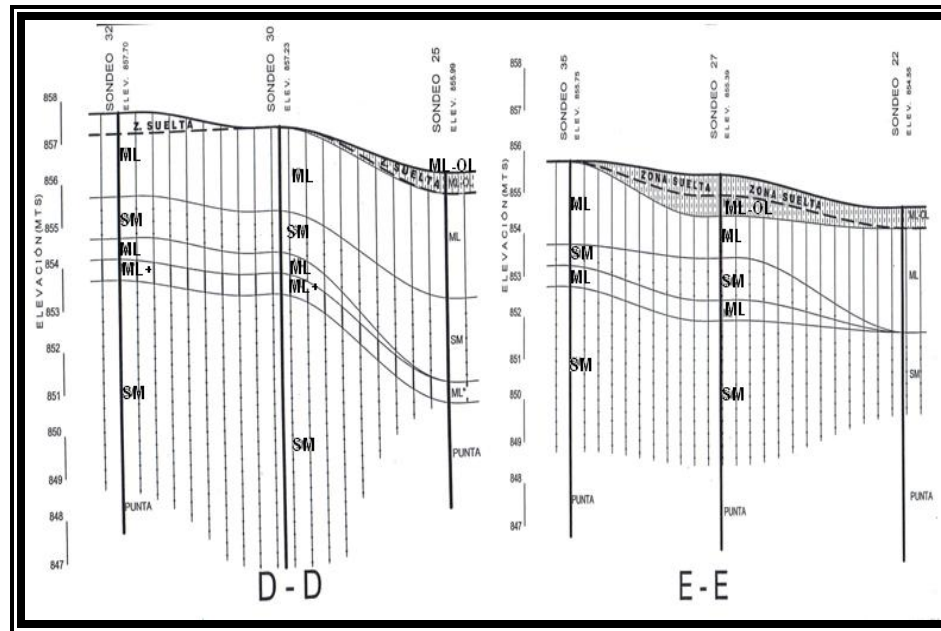


Figura 4.27: Perfiles estratigráficos de los materiales detectados en sondeos realizados con la prueba de penetración estándar en las proximidades de la Escuela Militar, San Salvador.<sup>30</sup>

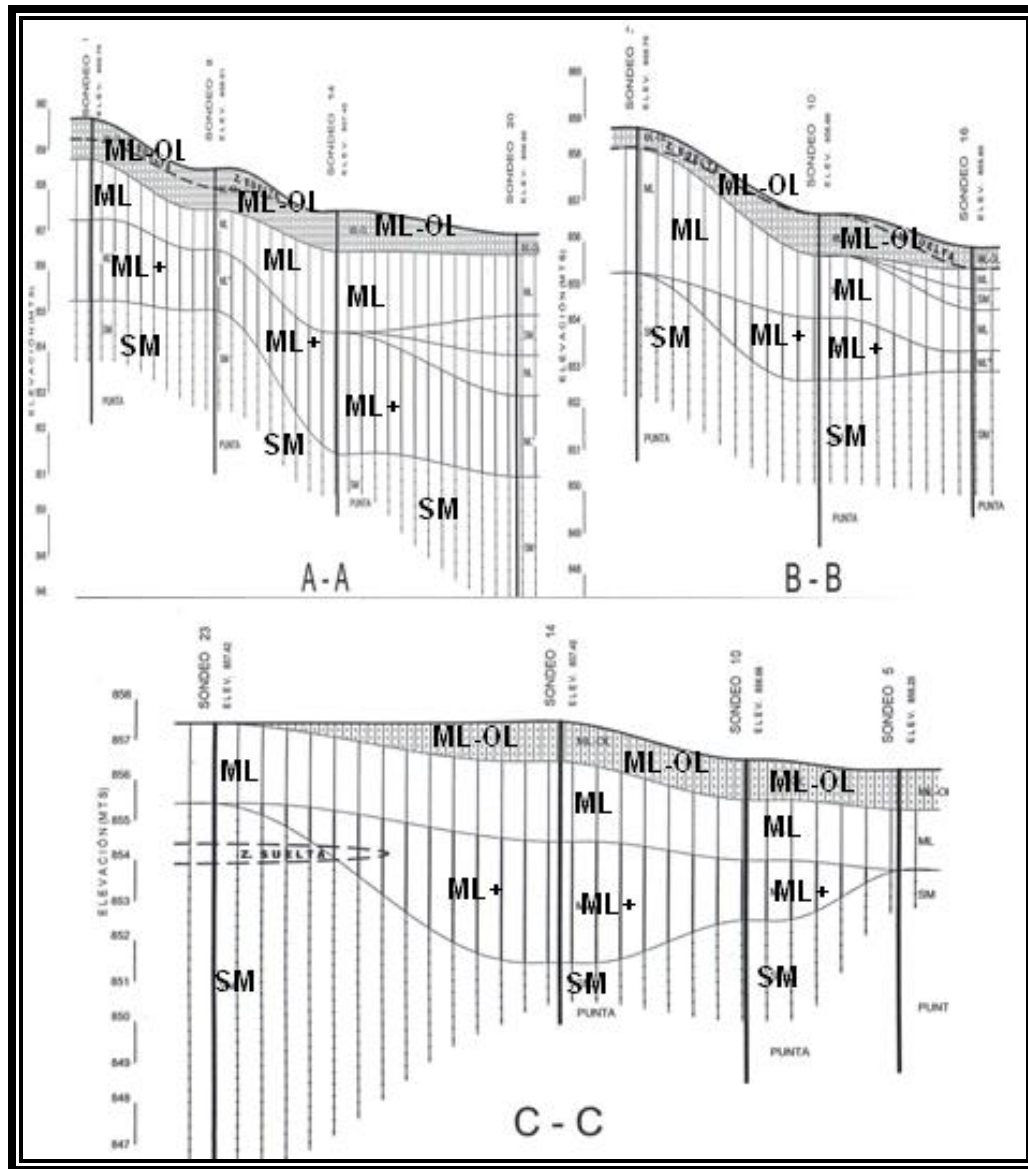


Figura 4.28: Perfiles estratigráficos de los materiales detectados en sondeos realizados con la prueba de penetración estándar en las proximidades de la Escuela Militar, San Salvador.<sup>30</sup>

Finalmente el perfil 9, ubicada en el Km 7+780, la primera capa alcanza una profundidad variable entre 0.50 m a 3.50 m y presenta una velocidad de onda  $V_p = 238$  m/s y se denominó como tierra blanca; el segundo estrato es tierra blanca compacta que alcanza una profundidad entre 8.50 m a 13.00 m y

presenta una velocidad  $V_p = 498$  m/s El último estrato presentó velocidad  $V_p = 1155$  m/s, y se denominó lava basáltica fracturada. (Marzo 2006).

- **Estudio de refracción sísmica realizado en Calle El Progreso, municipio de San Salvador (SM1).**

Se realizó una línea sísmica en un terreno ubicado en Calle El Progreso, San Salvador. Específicamente, los resultados muestran existencia de tres estratos en el subsuelo, el primero desde la superficie hasta una profundidad variable entre 1 – 5 metros, que muestra velocidades de ondas sísmicas P de 263 m/s que corresponderían a formaciones de tierra blanca (SM o ML) característica del A.M.S.S. El segundo estrato, subyacente al anterior, se extiende hasta una profundidad de 8 – 9 metros, y para el cual se registraron velocidades de ondas sísmicas P de 467 m/s, que corresponderían siempre a los mismos tipos de suelos pero en un estado de compacidad natural mayor. Para el tercer estrato, para el cual no se conoció límite inferior, se registraron velocidades de ondas sísmicas P de 776 m/s que corresponderían a un material diferente, el cual puede ser un material granular, ya sea arenas o gravas, material aluvional o roca meteorizada. No se registró nivel freático hasta la profundidad investigada. (Febrero de 2007).

- **Estudio de refracción sísmica realizado en Terreno Aledaño a GEVESA, Boulevard Los Próceres, municipio de San Salvador (A4).**

Se realizaron dos líneas sísmicas en un terreno aledaño a GEVESA, sobre Boulevard Los Próceres, San Salvador.

En la línea sísmica LS-01 ubicada con orientación N-S, se ha encontrado en el perfil estratigráfico tres estratos, el primero hasta una profundidad variable entre 1.0 m a 2.25 m, con una velocidad de ondas P de 249 m/s, el segundo estrato encontrado hasta una profundidad variable entre 7.75 m a 10.25 m con una velocidad de ondas P de 332 m/s ambos estratos corresponden a formaciones de tierra blanca, y por ultimo un tercer estrato de un espesor mayor de 15.25 m con una velocidad de ondas P de 587 m/s que corresponde a un suelo arenoso semicompacto.

En la línea sísmica LS-02 ubicada con orientación E-O, se ha encontrado en el perfil estratigráfico tres estratos, el primero hasta una profundidad variable de entre 0.50 m a 1.50 m, con una velocidad de ondas P de 237 m/s, el segundo estrato alcanza una profundidad variable entre 3.5 m a 6.5 m con una velocidad de ondas P de 384 m/s ambos estratos corresponden a formaciones de tierra blanca suelta a semisuelta, y por ultimo un tercer estrato de un espesor mayor de 13.0 m con una velocidad de ondas P de 629 m/s que corresponde a un suelo arenoso semicompacto

Del estudio de suelo elaborado a través de sondeos SPT en el área cercana a la línea sísmica LS-1 se ha encontrado la presencia de suelos tipo Arena limosa con un espesor promedio de 1.50 m, seguido por uno de suelo limo

arenoso de espesor variable de 1.50 a 5.0 m, luego se observa un suelo areno arcilloso de espesor variable 1.0 a 5.0 m, todos estos suelos tienen una compacidad variable que va de muy suelta a semisuelta y por ultimo se encuentra un estrato de una arena de origen pumítico con un espesor de mas de un metro con compacidad variable de semicompacta a compacta.

Para el perfil de suelo No 2 que contiene los sondeos SPT cercanos al área cercana a la línea sísmica LS-2 se ha encontrado la presencia de suelos tipo Arena limosa con un espesor variable de 0.5 a 3.0 m , seguido por uno de suelo limo arenoso de espesor variable de 1.50 a 5.5 m, luego se observa un suelo areno arcilloso de espesor que oscila entre 2.0 a 6.0 m, todos estos suelos tienen una compacidad variable que va de muy suelta a semi suelta y por ultimo se encuentra un estrato de una arena de origen pumítico con un espesor de mas de un metro (ver figuras 4.29 y 4.30).

Al analizar los perfiles tanto sísmicos como de sondeos SPT se puede concluir que las velocidades de ondas P de 237 a 249 m/s, corresponde al suelo arena limosa, la velocidad de ondas P de 332 a 384 m/s corresponde al estrato limo arenoso encontrado y que las velocidades de ondas P que varían de 587 a 629 m/s corresponde a los suelos arena arcillosa y arena pumítica.

Las velocidades de ondas P encontradas para los diferentes estratos proporcionan valores bajos ya que corresponden a suelos en estado suelto. (Septiembre 2006).

- **Estudio de refracción sísmica realizado en Terreno ubicado en Zona Rosa, Col. San Benito, municipio de San Salvador (S2).**

Se realizó un estudio de refracción sísmica consistente en dos líneas sísmicas, en terreno ubicado en Zona Rosa, Col. San Benito, San Salvador.

Con las líneas sísmicas se logró obtener registros de velocidad de ondas sísmicas hasta una profundidad máxima de 19m. Específicamente, los resultados muestran existencia de dos estratos en el subsuelo, el primero desde la superficie hasta una profundidad variable entre 7.5 y 15 metros, que muestra velocidades de ondas P entre 420 m/s y 433 m/s que corresponderían a formaciones de tierra blanca (SM o ML) característica del AMSS. El segundo estrato, subyacente al anterior, se extiende desde los 7.5m a 15m hasta por lo menos una profundidad de 19 metros, y para el cual se registraron velocidades de ondas P entre de 690 m/s y 727 m/s que corresponderían a un material más compacto o posiblemente a roca muy fracturada o intemperizada (ver figura 4.31). No se registro nivel freático hasta la profundidad investigada. (Octubre 2006).

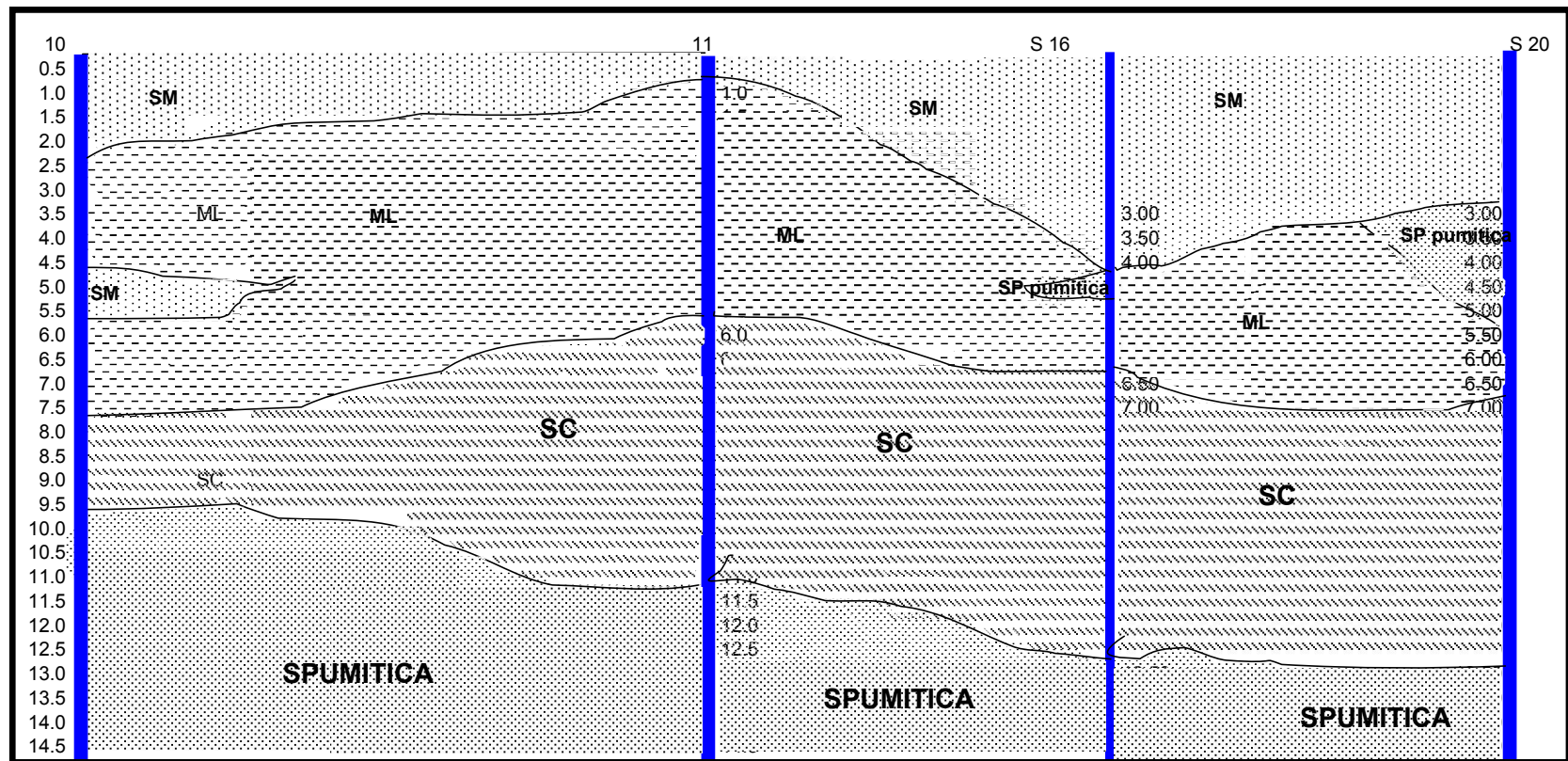


Figura 4.29: Perfiles estratigráficos de los materiales detectados en sondeos realizados con la prueba de penetración estándar en terreno aledaño a GEVESA, sobre Boulevard Los Próceres, San Salvador.<sup>30</sup>



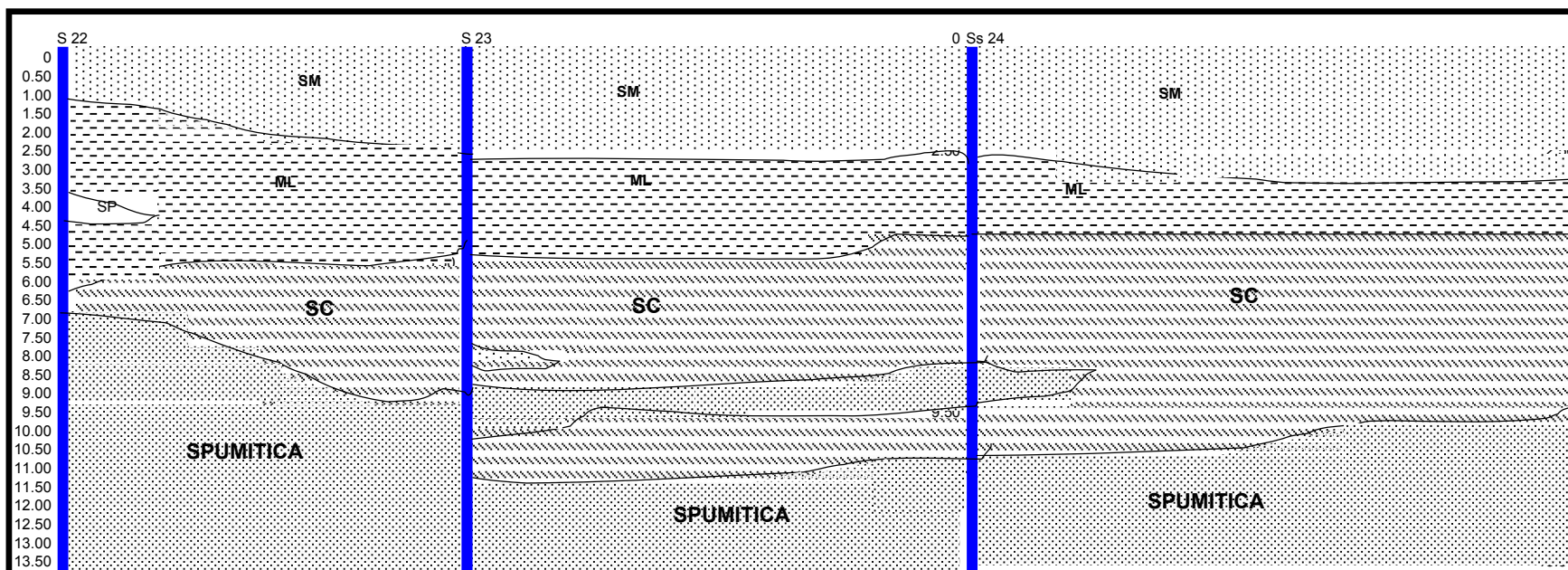


Figura 4.30 Perfiles estratigráficos de los materiales detectados en sondeos realizados con la prueba de penetración estándar en terreno aledaño a GEVESA, sobre Boulevard Los Próceres, San Salvador.<sup>30</sup>



Figura 4.31 Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Terreno ubicado en Zona Rosa, Colonia San Benito, San Salvador.<sup>30</sup>

- **Estudios de refracción sísmica realizado carretera Prolongación Orden de Malta y Calle a Huizúcar, municipio de Antiguo Cuscatlán (M1 Y M2).**

Se realizó un estudio de refracción sísmica consistente en treinta y un líneas sísmicas, en carretera Prolongación Orden de Malta y Calle a Huizúcar, Antiguo Cuscatlán.

El objetivo del estudio fue la determinación de la estratigrafía del terreno y la dureza de los materiales detectados para la evaluación de la capacidad de carga y la facilidad en la excavabilidad de los mismos.

Fueron detectados dos estratos. El primer estrato alcanza una profundidad entre 5.0 y 15.0 m, y presenta valores de velocidad de ondas P entre 278 y 393 m/s lo que indica la condición de un estrato excavable (valores de velocidad hasta los 1,500 m/s indican que los materiales pueden ser excavables) el cual puede

pertenecer al miembro s3'a de la formación San Salvador (piroclástitas ácidas), el cual corresponde a Arenas limosas (SM) o Limo arenosos (ML).

En el segundo estrato alcanza una profundidad entre 21 y 30.0 m y presenta valores de velocidad de ondas P entre 692-3418 m/s, en dicho estrato puede observarse que existen dos zonas a las cuales pueden pertenecer dos miembros geológicos:

- Zona 1: miembro “c1” de la formación Cuscatlán (piroclástitas ácidas más antiguas que el miembro s3'a) para el que se observa valores de menor velocidad y el cual corresponde a materiales excavables.
- Zona 2: miembro “b1” de la formación El Bálsamo (efusivas básica) para el que se observa valores de mayor velocidad y el cual corresponde a materiales marginalmente excavables (ver figura 4.32) Junio 2002.



Figura 4.32 Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en carretera Prolongación Orden de Malta y Calle a Huizúcar, San Salvador-Antiguo Cuscatlán.<sup>31</sup>

<sup>31</sup> Walter Hernandez,(2007). Entrevista: “Recopilación de estudios de refracción sísmica realizados en el municipio de San Salvador y zonas aledañas, Servicio Nacional de Estudios Territoriales.(SNET) 2001.

- **Estudios de refracción sísmica realizados Terreno Aledaño a Centro Comercial La Gran Vía, municipio de Antiguo Cuscatlán (E4).**

Se realizó un estudio de refracción sísmica consistente en cinco líneas sísmicas, en Terreno Aledaño a Centro Comercial La Gran Vía, Antiguo Cuscatlán.

Para la interpretación de los ensayos geofísicos, refracción sísmica, se utilizó la información geológica del mapa geológico oficial escala 1:100,000 y del estudio de suelos realizado previamente.

Se detectó la presencia de dos estratos, el superior más blando que constituye la llamada Tierra Blanca y el inferior que lo constituye una escoria. Esto se confirma con los ensayos de refracción sísmica agregando un tercer estrato que lo constituye un material de tipo rocoso.

En general, puede decirse que el primer estrato determinado tiene velocidades de ondas P entre 357 a 450 m/s con profundidades de 2.50 a 8.50 metros, el cual corresponde a materiales tipo Tierra Blanca y Lapilli Acrecional (de acuerdo a estudio de suelos se refiere a materiales tipo arena limosa, limo arenoso y arena mal graduada). El segundo estrato con velocidades de la ondas P de 635 a 1,582 m/s con profundidades entre 11.5 a 17.0 metros (en algunos lugares alcanzan valores de profundidad mayores a 28.0 m), corresponde a escoria volcánica (este material no fue identificado en el estudio de suelos) y el tercer estrato con velocidades de ondas P de 2,123 a 5,338 m/s que alcanza profundidades mayores a 18.0 m corresponde a roca de origen volcánico (Ver figura 4.33).



Figura 4.33. Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en terreno aledaño a Centro Comercial La Gran Via, Antiguo Cuscatlán.<sup>30</sup>

- **Estudios de refracción sísmica realizados en Cordillera El Bálsamo, al sur del municipio de Santa Tecla.**

El objetivo del estudio es proporcionar información del subsuelo en la zona del derrumbe de la Cordillera del Bálsamo y a través de los resultados de las investigaciones geofísicas evaluar las características mecánicas de resistencia de los terrenos con el fin de permitir la reconstrucción del área.

Se llevaron a cabo investigaciones de prospección geofísica, empleando el método de Refracción Sísmica con el objetivo de determinar el perfil estratigráfico de la zona en estudio. Estas investigaciones están orientadas a conocer las características físicas de los materiales en profundidad. Se ejecutaron



un total de cuatro líneas sísmicas, realizadas cada una en 4 zonas: Colonia Pinares de Suiza, Colonia El Paraíso, Colonia Las Colinas y Colonia Tierra Verde. Para la interpretación de los ensayos geofísicos, refracción sísmica, se utilizó la información geológica del mapa geológico oficial escala 1:100,000 y del estudio de suelos realizado previamente.

### **Evaluación de Colonia Pinares de Suiza (B1).**

El estratigráfico obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 300 m/s, con una profundidad promedio de 9.8 m, denominándose material tipo tierra blanca (nivel de piroclastitas no consolidadas); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 500 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 21.6 m y se denominó como Tierra Blanca consolidada (ver figura 4.34).



Figura 4.34 Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en alrededores de Colonia Pinares de Suiza, Santa Tecla.<sup>31</sup>

### **Evaluación de Colonia El Paraíso (B2).**

El estratigráfico obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 300 m/s, con una profundidad promedio de 6.1 m denominándose material tipo Tierra Blanca (nivel de piroclastitas no consolidadas); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 493 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 17.9 m y se denominó como Tierra Blanca consolidada (ver figura 4.35).

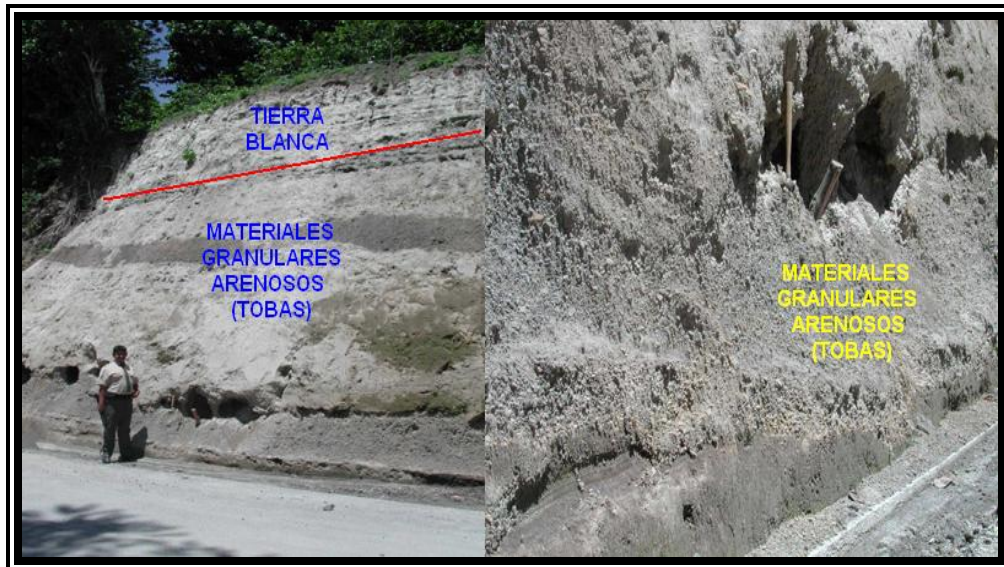


Figura 4.35. Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en alrededores de Colonia Guadalupe, Santa Tecla.<sup>8 Y 31</sup>

### **Evaluación de Colonia Las Colinas (B3).**

El estratigráfico obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 250 m/s, con una profundidad promedio de 6.5 m denominándose material tipo Tierra Blanca (nivel de piroclastitas no consolidadas); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 488 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 12.5 m y se denominó como Tierra Blanca consolidada (ver figura 4.36).



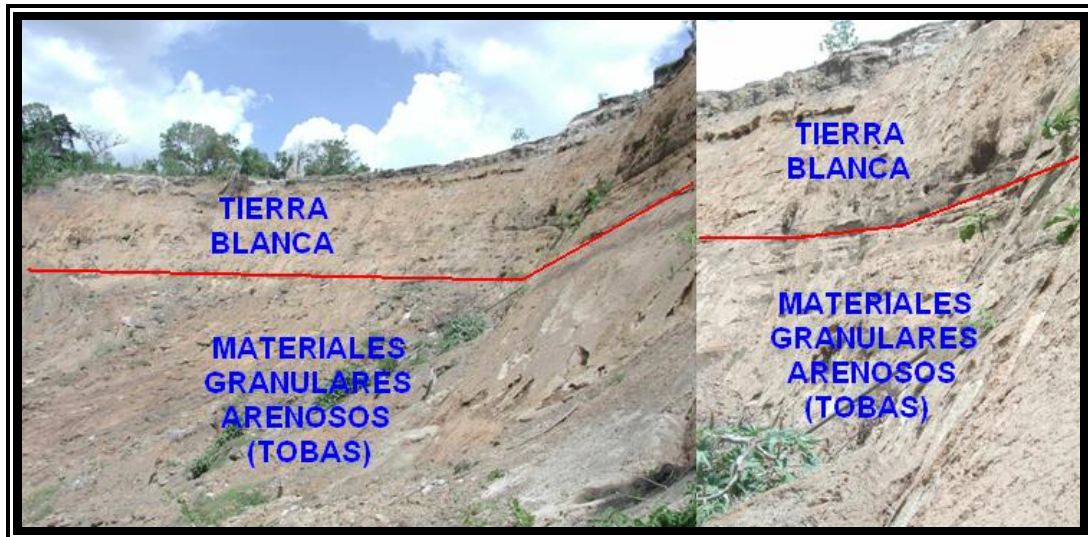


Figura 4.36 Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en alrededores de Colonia Las Colinas, Santa Tecla.<sup>31</sup>

#### **Evaluación de Colonia Tierra Verde (B4).**

El estratigráfico obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 285 m/s, con una profundidad promedio de 5.3 m denominándose material tipo Tierra Blanca (nivel de piroclastitas no consolidadas); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 488 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 13.8 m y se denominó como Tierra Blanca consolidada (ver figura 4.37). Julio 2002.



Figura 4.37 Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en alrededores de Colonia Tierra Verde, Santa Tecla.<sup>31</sup>

- **Estudio de refracción sísmica realizado en Instalaciones de Actual Casa Presidencial, municipio de San Salvador (A1).**

El estudio de refracción hecho en esta zona tuvo por objetivo analizar las propiedades dinámicas de los suelos mediante los resultados de medición tanto de Ondas P como S. Para la interpretación de los ensayos geofísicos, refracción sísmica, se utilizó la información geológica del mapa geológico oficial escala 1:100,000 y del estudio de suelos realizado previamente.

El ensayo de refracción sísmica en Casa Presidencial alcanzo una profundidad de 20 metros, donde existen tres estratos, el primero con una profundidad media de 8 metros y una velocidad de ondas P igual a 352 m/s (materiales tipo arena limosa y limo arenoso, según estudio de suelo), el segundo con una profundidad media de 13 metros y una velocidad de ondas P igual a 442 m/s (según estudio de suelo, materiales tipo tierra blanca tales como arena limosa y limo arenoso en

estado consolidado ó materiales tipo lapilli acrecional identificados como arena mal graduada), y el tercero con una profundidad de 20 metros y una velocidad de ondas P igual a 842 m/s y corresponde a escorias volcánicas, según mapa geológico (ver figura 4.38) Septiembre 2003.

PROFUNDIDAD m	1,5	ML	ML
			ML
			ML
	3	SM-OL	SM-OL
			SM-OL
			SM-OL
	6,5	SM	SM
			SM
			SM
			SM
			SM
			SM
			SM
	7,5	ML	ML
			ML
	10	OL	OL
		SM-OL	SM-OL
			SM-OL
			SM-OL
			SM-OL
		SM	SM
	13	SP	SP
			SP
			SP
			SP
			SP

Figura 4.38 Barra estratigráfica de los materiales detectados en sondeo realizado con la prueba de penetración estándar en Casa Presidencial, San Salvador.<sup>30</sup>

- **Estudio de refracción sísmica realizado en Centro Recreativo de la Policía Nacional Civil (P.N.C.), en Plan del Pito, municipio de Ayutuxtepeque (SR2).**

El estudio de refracción hecho en esta zona tuvo por objetivo analizar las propiedades dinámicas de los suelos mediante los resultados de medición tanto de Ondas P como S. Para la interpretación de los ensayos geofísicos, refracción sísmica, se utilizó la información geológica del mapa geológico oficial escala 1:100,000 y del estudio de suelos realizado previamente.

El ensayo de refracción sísmica en Centro de Recreativo de la Policía Nacional Civil, alcanzó una profundidad de 20 metros, donde existen tres estratos, el primero con una profundidad media de 6.0 metros y una velocidad de ondas P igual a 414 m/s (limo arenoso, según estudio de suelo) el segundo con una profundidad media de 11.0 metros y una velocidad de ondas P igual a 515 m/s (según estudio de suelo, materiales tipo tierra blanca tales como arena limosa y limo arenoso en estado consolidado), y el tercero con una profundidad mayor a 19.0 metros y una velocidad de ondas P igual a 869 m/s y corresponde a una toba superior consolidada compuesta de materiales granulares conocidos como arena mal graduada de partículas de pómez, según indica el estudio de suelos y mapa geológico (ver figura 4.39) Octubre 2003.

PROFUNDIDAD m		0,5	OL	OL
			ML	ML
		ML		
		ML		
		ML		
		ML		
		ML		
		ML		
		ML		
		ML		
		ML		
		ML		
		6,5	SM	SM
				SM
				SM
		8		ML
			ML	ML
		ML		
		ML		
		ML		
		10,5	OL	OL
			SM	SM
		12		SM-SP
			SM-SP	
		13	OL	OL
			SM	SM
			SP	SP
			SC	SC
			15	SM
		SM		
		18	SP	SP
				SP
SP				
SP				
SP				
SP				
21	SM	SM		
		SM		
		SM		
23		SM		

Figura 4.39 Barra estratigráfica de los materiales detectados en sondeo realizado con la prueba de penetración estándar en Centro Recreativo de P.N.C., Ayutuxtepeque.<sup>30</sup>

- **Estudios de refracción sísmica utilizados para realización de Trabajo de Graduación “Criterios Geotécnicos de Microzonificación y Estimación de la Propiedades Dinámicas de los Suelos del Área Metropolitana de San Salvador (A.M.S.S.)”, San Salvador.**

Los estudios de refracción sísmica utilizados en este trabajo de graduación fueron realizados por la empresa Rivera-Harrouch para fines desconocidos, y fueron realizados en diferentes zonas del A.M.S.S. El uso de la información obtenidas a partir de estos estudios se puso a disposición de los realizadores de esta investigación con el objeto de obtener una correlación empírica entre los valores de velocidad de propagación de ondas P obtenidos por refracción sísmica y los valores de “N” de la prueba de penetración estándar (S.P.T.) para ser utilizados en la determinación del módulo de Rigidez (G) usado para la estimación de las propiedades dinámicas de los suelos de San Salvador. Por otra parte, se utilizaron los perfiles obtenidos por refracción sísmica con el fin de corroborar los perfiles que fueron provistos de los resultados de estudios de suelos realizados con la prueba de penetración estándar (S.P.T.).

Se ejecutaron un total de nueve líneas sísmicas, realizadas en seis zonas: Cantón El Carmen (Ayutuxtepeque), Tanque en Colonia Escalón (San Salvador), San José de la Montaña (San Salvador), Colonia San Benito (San Salvador), Tanque en Cantón San Ramón (San Salvador) y Palacio de los Deportes (San Salvador). Para la interpretación de los ensayos geofísicos, refracción sísmica, se utilizó la

información geológica del mapa geológico oficial escala 1:100,000 y estudios de suelos realizados previamente.

**Evaluación de Cantón El Carmen, municipio de Ayutuxtepeque (SR3).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 213 m/s, con una profundidad promedio de 6.6m denominándose como material tipo tierra blanca (limo arenoso poco consolidado); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 670 m/s, la profundidad del estrato alcanza valores mayores a 15.2 m y se denominó como material tipo escoria volcánica.

**Evaluación de Tanque en Colonia Escalón, municipio de San Salvador (ES1).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 274 m/s, con una profundidad promedio de 6.1 m denominándose material tipo Tierra Blanca (limo arenoso con lentes de arcilla); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 625 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 18.3 m y se denominó como material tipo escoria volcánica.

**Evaluación de San José de la Montaña, municipio de San Salvador (SM2).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 414 m/s, con un espesor promedio de 6.1m denominándose material tipo Tierra Blanca (arena limosa o limo arenoso poco

consolidado); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 488 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 16.7 m y se denominó como Tierra Blanca con mayor grado de consolidación (ver figura 4.40).



Figura 4.40 Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en sitio próximo a Seminario San José de la Montaña, San Salvador.<sup>31</sup>

#### **Evaluación de Colonia San Benito, municipio de San Salvador (S2).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 412 m/s, con una profundidad promedio de 6.4 m denominándose material tipo Tierra Blanca (arena limosa o limo arenoso); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 640 m/s, la



profundidad del estrato es mayor a 12.2 m y se denominó como material tipo escoria volcánica (ver figura 4.41).



Figura 4.41 Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Colonia San Benito, San Salvador.<sup>31</sup>

#### **Evaluación de Tanque en Cantón San Ramón, municipio de San Salvador (SR1).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 265 m/s, con una profundidad promedio de 6.1m denominándose material tipo Tierra Blanca (limo arenoso ó arena limosa poco consolidado); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de

610 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 15.2m y se denominó como material tipo escoria volcánica.

**Evaluación de Palacio de los Deportes, municipio de San Salvador (CT1).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P entre 335 y 407 m/s, con una profundidad entre 0.7 y 2.4 metros denominándose material tipo Tierra Blanca (limo arenoso ó arena limosa poco consolidado); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad entre 457 y 549 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 19.2 m y se denominó como material tipo Tierra Blanca (limo arenoso ó arena limosa con mayor grado de consolidación). (Junio 1983).

- **Estudios de refracción sísmica utilizados para realización de Trabajo de Graduación “Análisis y Verificación de Interacción Dinámica Suelo-Estructura”, San Salvador.**

Los estudios de refracción sísmica utilizados en este trabajo de graduación fueron realizados por la empresa Consultora Técnica con el fin de investigar la influencia de la interacción dinámica suelo-estructura para una estructura en particular, como lo es el Hotel Real Intercontinental, del cual se poseen los registros de aceleraciones y desplazamientos en los niveles de sótano, primer nivel y azotea.

El trabajo comienza con la obtención de los parámetros dinámicos del suelo en el que ésta estructura está cimentada. Estos parámetros son obtenidos por medio

de ensayos de refracción sísmica, los cuales fueron corregidos por ecuaciones de modificación provenientes de la dispersión de los resultados de refracción sísmica, respecto de los ensayos “downhole”.

Con estos parámetros dinámicos del suelo se obtienen las funciones de impedancia, que simularán la capacidad de deformación y absorción de energía del suelo de cimentación.

Se ejecutaron un total de cinco líneas sísmicas, realizadas en cinco zonas, de las cuales las primeras cuatro están vinculadas con los sitios donde fueron realizados ensayos “downhole” como parte del estudio desarrollado por Consorcio Salvador E. (Valutazione della pericolosità sismica nelle aree del distretto Sanitario A3 ( San Salvador ) e del distretto 7 ( Apopa ), Ministerio de Relaciones) en el año de 1988 y, la quinta línea sísmica fue desarrollada en el lugar donde se ubica la estructura a investigar:

Hogar del Niño (San Salvador), Campus de la UCA (Antiguo Cuscatlán), Centro de Investigaciones Geotécnicas (San Salvador), Instituto Geográfico Nacional (Ciudad Delgado) y Hotel Real Intercontinental. (San Salvador). Para la interpretación de los ensayos geofísicos, refracción sísmica, se utilizó la información geológica del mapa geológico oficial escala 1:100,000.

#### **Evaluación de Hogar del Niño, municipio de San Salvador (CD1).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 490 m/s, con una profundidad promedio de 6.0 m denominándose como material tipo tierra blanca (limo arenoso ó arena limosa

poco consolidado); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 552 m/s, la profundidad del estrato alcanza valores mayores a 16.0 m y se denominó como material tipo Tierra Blanca (limo arenoso ó arena limosa con mayor grado de consolidación).

### **Evaluación de Campus de la UCA , municipio de Antigua Cuscatlán (A3).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 199 m/s, con una profundidad promedio de 2.0 m denominándose como material tipo tierra blanca (limo arenoso poco consolidado con lentes de arcilla); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 337 m/s, la profundidad del estrato alcanza valores mayores a 11.0 m y se denominó como material tipo Tierra Blanca (Arena limosa con gravilla) con mayor grado de consolidación (ver figura 4.42).

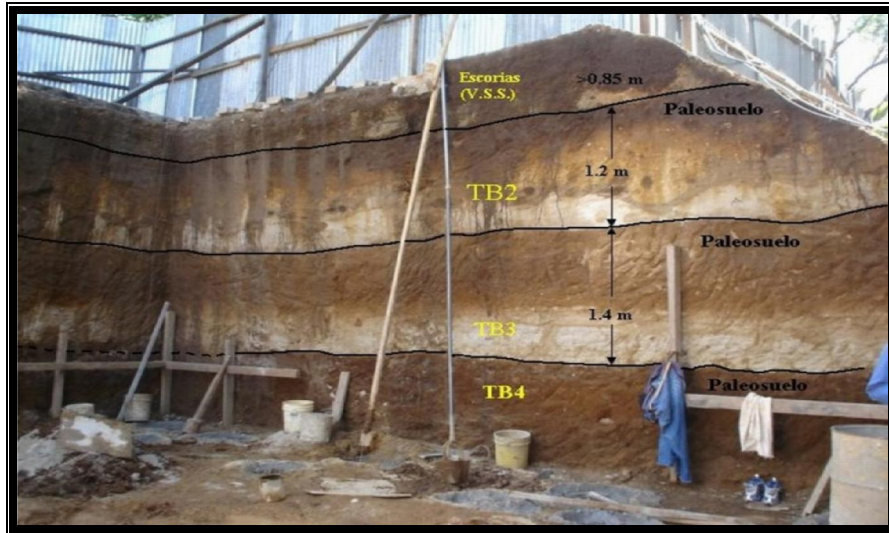


Figura 4.42 Materiales detectados en estudio de refracción sísmica realizado en Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (U.C.A.), Antiguo Cuscatlán.<sup>31</sup>

**Evaluación de Centro de Investigaciones Geotécnicas, municipio de San Salvador (CD2).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 448 m/s, con una profundidad promedio de 7.0 m denominándose material tipo Tierra Blanca (limo arenoso con lentes de arcilla ó arena limosa con gravilla); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 631 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 19.0 m y se denominó como material tipo escoria volcánica (toba gris soldada).

**Instituto Geográfico Nacional, municipio de Ciudad Delgado (CD3).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 113 m/s, con un espesor promedio de 4.0 m denominándose material tipo Tierra Blanca (arena limosa o limo arenoso poco

consolidado); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 349 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 11.0 m y se denominó como Tierra Blanca con mayor grado de consolidación (arena limosa o limo arenoso).

**Evaluación de Hotel Real Intercontinental, municipio de San Salvador**

**(SM3).**

El perfil obtenido está constituido por dos estratos, en el primero se obtuvo una velocidad de onda P de 260 m/s, con una profundidad promedio de 2.0 m denominándose material tipo Tierra Blanca (arena limosa o limo arenoso poco consolidado); debajo de éste se encontró un segundo estrato con una velocidad de 372 m/s, la profundidad del estrato es mayor a 13.0 m y se denominó como material tipo Tierra Blanca con mayor grado de consolidación (arena limosa o limo arenoso). (Febrero 2006).

- **Estudio de refracción sísmica realizado en Parqueo Norte, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, U.E.S., municipio de San Salvador (CT2).**

Se realizó un estudio de refracción sísmica consistente en una línea sísmica, en Parqueo Norte, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, U.E.S., San Salvador.

Del perfil sísmico obtenido claramente señala la existencia de tres estratos de material. El primero, desde la superficie hasta una profundidad promedio de 1.5 metros, muestra una velocidad de propagación de ondas P de 366 m/s, característico de materiales intemperizados ó de sedimentos no consolidados.

Con relación a la geología, se conoce que este material es proveniente de la Formación San Salvador (miembro S4), el cual se refiere a piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas, localmente efusivas ácidas, conocidas como “Tierra Blanca”. Esto corresponde a suelo areno-limoso (SM) en estado compacto ( $N > 30$  golpes) reportado en el estudio de suelos y los cuales predominan en los sondeos S-1 y S-2 hasta una profundidad de 1.0 metro.

El segundo estrato, subyaciendo al anterior, hasta una profundidad promedio de 6.5 metros, muestra una velocidad de propagación de ondas P de 520 m/s, característico de materiales intemperizados, ó de sedimentos no consolidados.

Con relación a la geología, se conoce que este material es proveniente de la Formación San Salvador (miembro S4), el cual se refiere a piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas, conocidas como “Tierra Blanca”. Esto corresponde, según el estudio de suelos, a materiales areno-limosos (SM) y limo-arenosos (ML) en estado suelto ( $N < 10$  golpes) con presencia de material orgánico (OL) y altos contenidos de humedad y el cual predomina en el sondeo S-2 hasta una profundidad aproximada de 8.5 metros. Estos materiales se consideran como suelos no-naturales o de relleno.

El tercer estrato, subyaciendo al anterior, hasta una profundidad de 13.5 metros, muestra una velocidad de propagación de ondas P de 480 m/s característico de materiales intemperizados ó grava o arena seca, o de sedimentos no consolidados. Con relación a la geología, se conoce que este material es proveniente de la Formación San Salvador (miembro S4), el cual se refiere a

piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas, conocidas como “Tierra Blanca”. Esto corresponde, según el estudio de suelos, a materiales areno-limosos (SM) y limo-arenosos (ML) y el cual predomina en los sondeos S-1 y S-2 hasta una profundidad aproximada de 10.0 metros (ver figura 4.23) Enero 2007.

#### **4.3.1 DESCRIPCION GEOLOGICA DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR.**

Geológicamente el área de San Salvador y sus alrededores inmediatos está conformada por tres tipos diferentes de formaciones rocosas, todas ellas de origen volcánico. Las antiguas datan del terciario superior (Plioceno), y las más jóvenes del Holoceno (Era Cuaternaria).

A continuación se presenta un resumen de los sucesos que dieron origen a estas formaciones, así como una breve explicación de los productos que las constituyen<sup>32</sup>.

##### **Formación del Bálsamo.**

Las rocas más antiguas, que afloran únicamente en la Cadena del Bálsamo, pertenecen a la serie de Tobas Aglomeráticas inferior cuyo espesor es por lo menos de 100 m.

En la cadena del Bálsamo hubo derrame de lavas feno-andesíticas, hasta aproximadamente 10 m de espesor. Al oriente de Antiguo Cuscatlan y por la parte norte de la Cadena del Bálsamo, estas lavas poseen un espesor de aproximadamente 20 m.

---

<sup>32</sup>Hernández Molina, Marta Eugenia (1998). Tesis “Elementos de Amenaza Sísmica en la Región Metropolitana de San Salvador”, U.C.A., San Salvador, El Salvador.



Durante el incremento de la actividad volcánica fueron expelidas series de polvo y cenizas color café claro, además fueron depositadas tobas pumíticas de color claro y tobas pumíticas de grano fino, las cuales en conjunto generalmente se denominan serie de toba aglomeráticas medias. Su espesor es de aproximadamente 80m.

Nuevas extrusiones produjeron extensas lavas, las cuales localmente están puestas encima de series más antiguas en forma de mantos extendidos de lavas.

En la Cadena del Bálsamo, estas capas de lava tienen hasta 15 m de espesor y una composición andesítica y basáltica. Es de suponerse que se formaron al mismo tiempo el Cerro de San Jacinto al oriente de la ciudad y los Cerros de Mariona al norte, igualmente como el de Santa Rosa cerca de Soyapango. Mientras el Cerro de San Jacinto predominantemente consiste de lavas andesíticas, los Cerro de Mariona se componen de lavas dacíticas y basálticas.

Hasta la fecha no se conoce la existencia de tobas fundidas del plioceno en la pendiente norte de la Cadena del Bálsamo, pero si existen al poniente de los Planes de Renderos.

Las tobas fundidas tienen estructuras visiblemente paralelas con partículas de pómez de forma alargada, todo en una matriz de color gris. Estas, cuyos espesores son de aproximadamente 25 m están situadas en el mencionado lugar directamente encima de las tobas aglomeráticas inferiores, su localización estratigráfica dentro del plioceno hasta la fecha no se conoce. Tobas fundidas del plioceno hasta ahora solamente se comprobaron al norte de San Salvador.

Entre el plioceno y pleistoceno se formaron durante un tiempo largo de poca actividad volcánica, suelos rojos por meteorización los cuales en su mayoría fueron erosionados.

La tierra roja está conservada solamente en pocos lugares: al poniente de los Planes de Renderos en la Cadena del Bálsamo, en el Cerro de San Jacinto y en los Cerros de Mariona. Al oriente de la Colonia San Vicente la tierra roja tiene su mayor espesor de aproximadamente 8 m.

### **Formación Cuscatlán.**

La formación Cuscatlán se extiende mucho, pero está cubierta por lavas jóvenes con espesores considerables en algunos lugares.

Las rocas piroclásticas (soldadas a tobas) alcanzan sus mayores espesores (80 m) en la montaña costera. En las orillas escarpadas del lago de Ilopango, depósitos claramente fluviales, re TRABAJADOS DE EPICLÁSTICOS, presenta espesores de más de 30 m las rocas piroclásticas y epiclásticas se observan casi solamente dentro de los cortes o afloramientos de paredes de quebradas y ríos.

Intercalaciones de rocas efusivas dentro de las secuencias piroclásticas no están distintamente localizadas en cualquier lugar.

Los cerros de Mariona y Santa Rosa, los cuales en general presenta horizontes de suelos café rojizo y café, de características arcillosas de aproximadamente 0.50 m de espesor, están presentes en la formación Cuscatlán no siempre correlativos. Las rocas piroclásticas y epiclásticas cuando están frescas son densas y masivas y muestran una estratigrafía distintiva; por lo que al ser meteorizadas se desintegran y descomponen, ya sea formando suelos arenosos o suelos de características arcillosas.

La interrelación de las rocas piroclásticas y epiclásticas no puede distinguirse microscópicamente; sin embargo, en zonas afectadas por actividad tectónica fuerte,

algunas fisuras son fácilmente reconocibles, por ejemplo dentro del Distrito norte de la ciudad (río Urbina y río Acelhuate), en donde las juntas superficiales presentan una mineralización característica (Cuarzo, Limonita y Calcita).

Las rocas piroclásticas se componen de forma irregular, algunas veces en fragmentos laminares y no son resistentes a los esfuerzos mecánicos, las rocas piroclásticas consisten en rocas de granos finos, pómez de color castaño claro a amarillento blanquecino, y localmente de depósitos de cenizas volcánicas de color gris oscuro con fragmentos grandes de pómez de 5 cm.

#### **Formación San Salvador.**

La formación San salvador es la formación geológica mas joven y abarca completamente el AMSS. Los materiales que componen son en su mayoría productos piroclásticos y epiclásticos. A continuación se presenta una síntesis de los acontecimientos más importantes que dieron origen a esta formación.

En el pleistoceno la expulsión de materiales volcánico en la cuenca de San Salvador se concreto mayormente en el volcán de San Salvador (Boquerón) Fueron expelidas tobas de color café, además tobas aglomeráticas las cuales se comprenden como Tobas Aglomeráticas Superior. Su espesor máximo se de 10m.

En tiempos sin actividad volcánica, las series volcánicas recientes producidas fueron erosionadas y nuevamente depositadas en ligares mas bajos.

Como material predominante de las Tobas Aglomeráticas Superiores resulto una serie fluvial se 6.5 m de espesor aproximadamente y que se compone de una secuencia de arcillas de estratificación diagonal de las arenas y gravas. Al regenerarse la actividad

volcánica, fueron expelidas en diferentes direcciones predominantemente lavas porosas y escorias de composición andesítica y de menos importancia basáltica. (Espesor 6.0 m aproximadamente hasta 10.0 m máximo)

Erupciones reanudadas depositaron las tobas de color café que consisten en tobas de cenizas de color café de grano grueso y fino, tobas pumíticas de color café claro y amarillento y en las cercanías del volcán predominan escorias de color gris negro. El espesor es de 1 m hasta 20.0 m máximo.

Durante tiempos de calma y de disminución de la actividad efusiva y extrusiva, muchas veces se formaron horizontes de suelos color café, hasta un espesor de 1.5 m, por la transportación fluvial de tobas de polvo y de cenizas en áreas mas bajas se depositaron predominantemente arenas gruesas y finas, en las cuales aparecen muchas veces vacíos de erosiones rellenas de gravas.

Aproximadamente al terminar el Pleistoceno se formo el cráter de explosión de la Laguna al poniente de Antiguo Cuscatlán, expulsando cenizas de color café, pero predominantemente escorias negras. La dirección de las efusiones o de los vientos, causaron que el material se depositara de preferencia al oeste del cráter de la Laguna. El espesor del muro de escorias en la cercanía inmediata al cráter es de 25 m máximo. Estas escorias se formaron casi al mismo tiempo que las tobas de color café.

En el holoceno, la actividad volcánica se traslado a la cuenca del lago Ilopango, suponiéndose que nubes ardientes depositaron tobas de mucho espesor, blancas, dacíticas, tanto cenizas como pómez, el mayor espesor que alcanzan estas tobas pumíticas denominas “tierra blanca”, es aproximadamente 50.0 m en la cercanía del

Lago de Ilopango, reduciéndose rápidamente al distanciarse de los centros erupción. Por la faldas del Boquerón y del cerro de San Jacinto, así como por la Cadena del Bálsamo, el espesor mediano es de 1.0 hasta 4.0 m máximo. Dependiendo del relieve anterior, el espesor de la tierra blanca puede aumentar considerablemente, aunque mas distanciado del centro de erupción. Así por ejemplo, aumenta en el área urbana el espesor de valles fósiles hasta 12 m, mientras el espesor mediano en las cercanías solamente tiene un máximo de 4.0 a 5.0 m (Colonia Escalón, Mejicanos y San Marcos).

Después del deposito de estas tobas pumíticas de color blanco, se formaron en la superficie actual suelos orgánicos negros con un espesor máximo de 1.5 m dentro del área de la ciudad. Estos fueron y siguen siendo formados en mayor escala por influencias de la meteorización, pero al mismo tiempo destruidos por efectos de la erosión y del actividad humana.

#### **4.3.2 ESTRATIGRAFIA DE LA A.M.S.S.<sup>32</sup>**

Tal como se mencionó anteriormente, los materiales geológicos existentes en el A.M.S.S. y sus alrededores, corresponden a productos volcánicos provenientes de tres fuentes principales de actividad: Volcán de San Salvador (Boquerón), Volcán de Ilopango y cráter de la Laguna.

Todos estos materiales consisten principalmente de intercalaciones de depósitos primarios y retrabajados, donde sobresalen las series de cenizas volcánicas, las tobas de pómez y las lavas andesíticas y basálticas.

### **Cenizas Volcánicas.**

El A.M.S.S. se constituye básicamente por cenizas dacíticas de origen volcánico, conocidas locamente como “Tierra Blanca”, que son productos piroclásticas con características friccionantes en los que predomina la pómez, que es un silicato de aluminio y hierro generalmente ácido de reducida densidad como espuma solidificada, la cual presenta diferentes colores, como blanco, gris acero, gris verdoso, rosado, gris intenso, según la composición química.

Sus granos tienen forma equi-dimensional y su textura es rugosa, la distribución granulométrica varía, pero básicamente se puede clasificar como liso arenoso (ML) o arena limosa (SM) de muy baja elasticidad. Los porcentajes de arena de pómez varían de unos pocos metros al pie del volcán de San Salvador, hasta alcanzar grandes espesores en los alrededores del Lago de Ilopango.

Las cenizas volcánicas debido a su origen geológico poseen un grado de cimentación muy variable, llegando, incluso en algunos casos, a formar taludes naturales completamente verticales. Por otra parte son materiales fácilmente erosionables, sobre todo en aquellos casos en que no tienen protección.

### **Tobas De Pómez o Tobas Color Café.**

Son materiales piroclásticos ácidos o menos consolidados que presentan una coloración que va de café a amarillenta, de la cual se desprende su nombre.

Las tobas de pómez son el resultado de erupciones por el volcán de San Salvador. En algunos lugares, sobre todo al oeste de la capital, se encuentran subyaciendo a una

escoria negra proveniente del cráter de explosión de La Laguna, debido a que ambos materiales se produjeron casi simultáneamente. Los espesores de las tobas color café varían considerablemente cerca del Volcán San Salvador y disminuyen rápidamente a medida que se alejan del mismo. Las más consolidadas se encuentran únicamente en afloramientos de gran espesor y su compacidad difiere mucho, dependiendo principalmente del grado de consolidación natural. Al igual que la tierra blanca, son materiales altamente erosionables cuando se exponen a intensas lluvias en zonas de poca vegetación, hasta el grado de originarse grandes surcos erosivos.

### **Flujos de Lava.**

Estos materiales que forman la base de la formación San Salvador, corresponden al menos a dos flujos de lava andesítico-basálticas provenientes del volcán San Salvador. Poseen un espesor de 5 a 10 m de espesor, granulometría de fina a media, tienen juntas delgadas y son escoriadas en la base y en la superficie; su estructura es laminar, lo que significa que están dispuestos en capas o laminas una sobre otra en forma paralela. De estas corrientes de lava, la más ancha es la que se derramo al sur de la ciudad, hasta aproximadamente la orilla oriental de la misma, por lo que se identifica como la corriente de lava sur; se encuentra a una profundidad que varia de 5 a 9 m, su ancho es de 2 a 3 km al pie del Boquerón y de 500 m en la Colonia La Chacra. El otro flujo derramado al norte, está a una profundidad de 15 a 20 m por debajo de la actual superficie hasta el río Urbina, su ancho varía de 500 m en las faldas del Volcán de San Salvador hasta 250 m en el extremo oriente del A.M.S.S.

### 4.3.3 SECUENCIA ESTRATIGRAFICA DE SAN SALVADOR

A continuación se presenta en la tabla 4.16, la secuencia estratigráfica geológica de los estratos, la cual tiene un orden decreciente, iniciando con los estratos superficiales y finalizando con los más profundos.

ORDEN DECRECIENTE	DESCRIPCION	ESPESOR (m)
FORMACION SAN SALVADOR		
8	Aluvión (Incluyendo material artificialmente retrabajado)	20
7	Depósitos piroclásticos ácidos y depósitos volcánicos epiclásticos (Tierra Blanca)	50
6	Depósitos piroclásticos ácidos y depósitos volcánicos epiclásticos (Tobas Color Café)	25
5	Rocas efusivas andesíticas y Basálticas, localmente escoria, parcialmente intercalada en 6.	10
FORMACION CUSCATLAN.		
4	Rocas efusivas ácidas intermedias parcialmente de la misma edad o mas antiguas que 3	25
3	Rocas piroclásticas ácidas y volcánicas epiclásticas, localmente ignimbritas y depósitos de tobas soldadas (arriba de 25 m de espesor)	80
FORMACION BALSAMO.		
2	Rocas efusivas andesítico-basálticas, parcialmente de la misma edad que 1.	30
1	Rocas volcánicas epiclásticas y rocas piroclásticas básicas con intercalaciones de corrientes de lavas andesíticas (arriba de 10 m de espesor)	100

Tabla 4.16 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos de San Salvador.<sup>32</sup>



#### 4.3.4 IDENTIFICACION DE LAS FORMACIONES.

##### 4.3.3.1 ÁREA DE ANTIGUO CUSCATLÁN.

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar (Boulevard Los Próceres) que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación San Salvador. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.17. En tabla 4.18 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona.

Sigla	Descripción
s4	Ceniza volcánica de color blanco, poco consolidada (Tierra blanca) ( <b>limo de baja compresibilidad o Arena limosa</b> )
s3'a	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café (ignimbritas)</b>
s2	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. ( <b>lavas andesíticas, lavas basálticas y escorias</b> )

Tabla 4.17 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos de San Salvador (Antiguo Cuscatlán).<sup>32</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad* (m)	Vp (m/s)	
A1	Casa Presidencial	San Salvador	s3'a	7.5	352	12.0	442	19.1	842	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB) poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como Tierra Blanca en estado consolidado y arenas mal graduadas (SP) proveniente de Plan de La Laguna. El tercer estrato corresponde a escorias volcánicas proveniente del V. de San Salvador.
A2	Hotel Siesta I, Blvd. Los Próceres	Antiguo Cuscatlán	s4	2.3	251	11.3	373	20.0	1007	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como TB en estado consolidado y arenas mal graduadas proveniente de Plan de La Laguna. El tercer estrato se relacionó a lava basáltica fracturada.
A2	Hotel Siesta II, Blvd. Los Próceres	Antiguo Cuscatlán	s4	2.0	352	9.0	1309	13.0	1930	El primer estrato se vinculó a materiales conocidos como TB en estado consolidado y arena mal graduada proveniente de Plan de La Laguna. El segundo estrato corresponde a lavas basálticas fragmentada. El tercer estrato se vinculó a lava basáltica.
A2	Hotel Siesta III, Blvd. Los Próceres	Antiguo Cuscatlán	s4	2.0	238	10.8	498	24.0	1155	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como TB en estado consolidado y arena mal graduada proveniente de Plan de La Laguna. El tercer estrato se relacionó a lava basáltica fracturada.

Tabla 4.18 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Antiguo Cuscatlán.<sup>30</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	
A3	UCA	Antiguo Cuscatlán	s3'a	2.0	199	11.0	337	----	----	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB) poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como Tierra Blanca en estado consolidado.
A4	GEVESA I, Blvd. Los Próceres	San Salvador	s3'a	1.0	249	8.3	332	12.3	587	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como TB en estado consolidado. El tercer estrato se relacionó a suelo granular semicompacto.
A4	GEVESA II, Blvd. Los Próceres	San Salvador	s3'a	1.0	237	5.5	384	12.0	629	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como TB en estado consolidado. El tercer estrato se relacionó a suelo granular semicompacto.

Tabla 4.18 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Antiguo Cuscatlán (Continuación)<sup>30</sup>.

#### 4.3.3.2 ÁREA DE CENTROS COMERCIALES EL ESPINO.

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación San Salvador. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.19. En tabla 4.20 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona.

Sigla	Descripción
s4	Ceniza volcánica de color blanco, poco consolidada (Tierra blanca) <b>(limo de baja compresibilidad o Arena limosa)</b>
s3'a	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café(ignimbritas)</b>
s5'b	Conos de acumulación ( escorias, tobas de Lapilli, cinder) <b>(arena mal graduada semi-compacta, escorias volcánicas)</b>
s2	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. <b>(lavas andesíticas, lavas basálticas y escorias)</b>

Tabla 4.19 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Centros Comerciales El Espino.<sup>32</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad* (m)	Vp (m/s)	
E1	Boulevard Merliot Norte I	Antiguo Cuscatlán	s4	2.4	208	20.0	1053	24.0	2121	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB) poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a lava andesítica y basáltica fracturada . El tercer estrato corresponde a a lava basáltica firme.
E1	Boulevard Merliot Norte II	Antiguo Cuscatlán	s4	1.3	183	16.5	868	24.0	1629	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB) poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a lava andesítica y basáltica muy fracturada . El tercer estrato corresponde a a lava basáltica.
E1	Boulevard Merliot Norte III	Antiguo Cuscatlán	s4	1.5	303	19.0	1376	24.0	1832	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB) poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a lava andesítica y basáltica muy fracturada . El tercer estrato corresponde a a lava basáltica.
E2	Finca El Espino, Anexo a Escuela Militar	Antiguo Cuscatlán	s4	4.8	403	20.0	634	24.0	1250	El primer estrato se identificó como TB consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales mezcla de arena limosa, gravas y bombas de lava. El tercer estrato se relacionó a lava basáltica fracturada.

Tabla 4.20 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Centros Comerciales El Espino.<sup>30</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	
E3	Avenida Jerusalén I	San Salvador	s4	2.5	312	10.8	499	24.0	1345	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se relacionó a una mezcla de arena, grava y roca fracturada. El tercer estrato corresponde a lava basáltica fracturada.
E3	Avenida Jerusalén II	San Salvador	s4	1.5	198	8.8	371	24.0	606	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a TB consolidada y arena mal graduada proveniente del Plan de La Laguna. El tercer estrato corresponde a una mezcla de arena, grava y roca fracturada.
E4	Terreno Aledaño a La Gran Vía I	Antiguo Cuscatlán	s'3a	8.5	450	36.5	1255	----	----	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada y arena mal graduada proveniente del Plan de La Laguna. El segundo estrato se vinculó a Escoria Volcánica proveniente del Volcán de San Salvador. El tercer estrato corresponde a roca de origen volcánico.
E4	Terreno Aledaño a La Gran Vía II	Antiguo Cuscatlán	s'3a	2.5	432	11.5	635	35.5	2123	
E4	Terreno Aledaño a La Gran Vía III	Antiguo Cuscatlán	s'3a	4.5	357	17.5	1189	35.5	5338	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada y arena mal graduada proveniente del Plan de La Laguna. El segundo estrato se vinculó a Escoria Volcánica proveniente del V. de San Salvador. El tercer estrato corresponde a roca de origen volcánico.
E4	Terreno Aledaño a La Gran Vía IV	Antiguo Cuscatlán	s'3a	7.2	368	34.2	1582	----	----	
E4	Terreno Aledaño a La Gran Vía V	Antiguo Cuscatlán	s'3a	8.0	389	13.0	935	----	----	

Tabla 4.20 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Centros Comerciales El Espino (Continuación).<sup>30</sup>

#### 4.3.3.3 ÁREA DEL BOULEVARD ORDEN DE MALTA.

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación San Salvador. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.21. En tabla 4.22 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona.

Sigla	Descripción
<b>s3'a</b>	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café(ignimbritas)</b>
<b>c1</b>	Piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas ( <b>Tobas volcánicas tipo ignimbritas, si están con rocas epiclásticas en estado semi-sólido son duras y masivas; en arena suelta o material arcilloso se desintegran</b> ).
<b>b3</b>	Efusivas básicas intermedias.( <b>Rocas andesíticas y basálticas</b> )
<b>b1</b>	Epiclastitas volcánicas y piroclastitas; localmente efusivas básicas intermedias.( <b>Tobas color café(ignimbritas), cenizas y escorias (tobas aglomeráticas inferiores)</b> ).

Tabla 4.21 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Boulevard Orden de Malta.<sup>32</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad* (m)	Vp (m/s)	
M1	0+200 al 0+275	Antiguo Cuscatlán	s3'a	6,0	350	21,0	759	—	—	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se relacionó a dos miembros geológicos: miembro "c1" de la formación Cuscatlán (piroclastitas ácidas más antiguas que el miembro s3'a) para el que se observa valores de menor velocidad y miembro "b1" de la formación El Bálsamo (efusivas básica) para el que se observa valores de mayor velocidad
M1	0+505 al 0+682	Antiguo Cuscatlán	s3'a	15,0	362	25,0	722	—	—	
M1	0+682 al 0+760	Antiguo Cuscatlán	s3'a	5,0	393	25,0	806	—	—	
M1	0+964 al 1+082	Antiguo Cuscatlán	s3'a	10,0	362	20,0	692	—	—	
M1	1+260 al 1+370	Antiguo Cuscatlán	c1	10,0	304	20,0	1064	—	—	
M1	1+390 al 1+495	Antiguo Cuscatlán	c1	5,0	278	30,0	1288	—	—	
M1	1+570 al 1+711	Antiguo Cuscatlán	c1	10,0	286	20,0	1605	—	—	
M1	1+739 al 1+772	Antiguo Cuscatlán	b1	10,0	344	25,0	3418	—	—	
M1	1+940 al 2+045	Antiguo Cuscatlán	c1	10,0	325	20,0	931	—	—	
M1	2+065 al 2+170	Antiguo Cuscatlán	c1	10,0	341	25,0	1197	—	—	

Tabla 4.22 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Boulevard Orden de Malta.<sup>30</sup>



#### 4.3.3.4 ÁREA DE COLONIA ESCALÓN

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación San Salvador. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.23 En tabla 4.24 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona.

Sigla	Descripción
s4	Ceniza volcánica de color blanco, poco consolidada (Tierra blanca) ( <b>limo arenoso o Arena limosa normalmente consolidada</b> )
s3'a	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café(ignimbritas)</b>
s2	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. ( <b>lavas andesíticas, lavas basálticas y escorias</b> )

Tabla 4.23 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Colonia Escalón.<sup>32</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	
ES1	Col. Escalón	San Salvador	s2	6.1	274	18.3	625	----	----	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se relacionó a escoria volcánica proveniente del Volcán de San Salvador.
ES2	Final Paseo Gral. Escalón I	San Salvador	s2	2.4	200	9.4	422	18.6	733	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se relacionó a suelos granulares arenosos – gravosos de compacidad semi-densa a densa. El tercer estrato denota un tipo de suelo en estado más compacto o posiblemente a roca muy fracturada o intemperizada
ES2	Final Paseo Gral. Escalón II	San Salvador	s2	2.6	361	7.8	433	12.6	556	
ES2	Final Paseo Gral. Escalón III	San Salvador	s2	2.2	247	8.3	322	16.5	800	El primer estrato se identificó como materiales sueltos no consolidados (arenas mal graduadas proveniente del Plan de La Laguna) . El segundo estrato se relacionó a materiales tipo escoria volcánica con trazas, incrustaciones y rocas de diferentes tamaños. El tercer estrato denota suelos que incluyen materiales tales como arenas, gravas y fragmentos de roca de diferentes tamaños a mayor profundidad.
ES2	Final Paseo Gral. Escalón IV	San Salvador	s2	3.5	255	17.5	345	24.0	700	
ES2	Final Paseo Gral. Escalón V	San Salvador	s2	2.0	240	3.5	265	6.0	356	
ES2	Final Paseo Gral. Escalón VI	San Salvador	s2	3.3	238	4.5	279	8.0	430	
ES3	Calle del Mirador I	San Salvador	s2	3.0	364	9.0	434	24.0	1061	El primer estrato se identificó como TB. El segundo estrato se relacionó a dos tipos de materiales: para la parte sur del sitios corresponde a un material granular con bloques pequeños de roca; para la parte norte del sitio corresponde a gravas con una matriz de piedra bastante fisurada (material granular y bloques pequeños de roca). El tercer estrato denota a una matriz de roca fracturada o arenas mezcladas con rocas fragmentadas de alta densidad.
ES3	Calle del Mirador II	San Salvador	s2	8.0	440	21.0	674	24.0	1493	
ES3	Calle del Mirador III	San Salvador	s2	8.0	369	18.0	650	----	----	

Tabla 4.24 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Colonia Escalón.<sup>30</sup>

#### 4.3.3.5 ÁREA DE COLONIA SAN BENITO

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación San Salvador. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.25. En tabla 4.26 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona.

Sigla	Descripción
s4	Ceniza volcánica, predominantemente de color blanco, poco consolidada (Tierra blanca) <b>(limo arenoso o Arena limosa normalmente consolidada)</b>
s3'a	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café(ignimbritas)</b>
s2	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. <b>(lavas andesíticas, lavas basálticas y escorias)</b>

Tabla 4.25 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Colonia San Benito.<sup>32</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	
S1	Colonia San Benito.	San Salvador	s4	6.4	411	12.2	640	----	----	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB). El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como Escoria Volcánica proveniente de Volcán de San Salvador.
S2	Zona Rosa I, Col. Benito	San Salvador	s3'a	15.0	433	21.0	727	----	----	El primer estrato se identificó como TB. El segundo estrato se vinculó a roca muy fracturada o intemperizada.
S2	Zona Rosa II, Col. Benito	San Salvador	s3'a	7.5	420	19.0	690	----	----	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a suelos densos o a roca muy fracturada o intemperizada.

Tabla 4.26 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Colonia San Benito<sup>30</sup>.

#### 4.3.3.6 ÁREA DEL MONUMENTO AL SALVADOR DEL MUNDO

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación San Salvador. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.27 En tabla 4.28 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona.

<b>Sigla</b>	<b>Descripción</b>
<b>s4</b>	Ceniza volcánica, predominantemente de color blanco, poco consolidada (Tierra blanca) ( <b>limo arenoso o Arena limosa normalmente consolidada</b> )
<b>s3'a</b>	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café(ignimbritas)</b>
<b>s2</b>	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. ( <b>lavas andesíticas, lavas basálticas y escorias</b> )

Tabla 4.27 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área del Monumento Al Salvador del Mundo.<sup>32</sup>

Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
			Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad* (m)	Vp (m/s)	
Calle El progreso, Col. Roma	San Salvador	s3'a	2.7	263	8.4	467	13.0	776	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como TB en estado consolidado. El tercer estrato se relacionó a material granular, ya sea arenas o gravas, material aluvional o roca meteorizada.
San José de la Montaña	San Salvador	s4	6.1	415	16.8	488	----	----	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB). El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como Tierra Blanca con mayor grado de consolidación.
Hotel Camino Real	San Salvador	s4	2.0	260	13.0	372	----	----	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como TB con mayor grado de consolidación.

Tabla 4.28 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de El Salvador del Mundo.<sup>30</sup>

#### 4.3.3.7 ÁREA DE CENTRO DE SAN SALVADOR.

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación San Salvador. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.29 En tabla 4.30 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona.

Sigla	Descripción
s4	Ceniza volcánica, predominantemente de color blanco, poco consolidada (Tierra blanca) ( <b>limo arenoso o Arena limosa normalmente consolidada</b> )
s3'a	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café(ignimbritas)</b>
s2	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. ( <b>lavas andesíticas, lavas basálticas y escorias</b> )

Tabla 4.29 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Centro de San Salvador.<sup>32</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad* (m)	Vp (m/s)	Profundidad* (m)	Vp (m/s)	Profundidad* (m)	Vp (m/s)	
CT1	Palacio de los Deportes I	San Salvador	s4	0.7	396	16.3	549	----	----	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se relacionó a Tierra Blanca con mayor grado de consolidación
CT1	Palacio de los Deportes II	San Salvador	s4	0.8	407	12.0	472	----	----	
CT1	Palacio de los Deportes III	San Salvador	s4	1.6	335	16.6	457	----	----	
CT1	Palacio de los Deportes IV	San Salvador	s4	2.4	343	19.2	472	----	----	
CT2	Universidad de El Salvador (U.E.S.)	San Salvador	s4	1.5	366	6.5	520	13.5	480	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se relacionó a Tierra Blanca con presencia de material orgánico (OL) y altos contenidos de humedad (suelos no-naturales o de relleno). El tercer estrato corresponde a Tierra Blanca con mayor grado de consolidación.

Tabla 4.30 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Centro de San Salvador.<sup>30</sup>



#### 4.3.3.8 ÁREA DE SAN JACINTO Y CIUDAD DELGADO.

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación San Salvador. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.31. En tabla 4.32 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona.

Sigla	Descripción
<b>s4</b>	Ceniza volcánica, predominantemente de color blanco, poco consolidada (Tierra blanca) <b>(limo arenoso o Arena limosa normalmente consolidada)</b>
<b>s3'a</b>	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café(ignimbritas)</b>
<b>s2</b>	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. <b>(lavas andesíticas, lavas basálticas y escorias)</b>
<b>b3</b>	Efusivas básicas intermedias. <b>(Rocas andecíticas y basálticas)</b>

Tabla 4.31 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de San Jacinto y Ciudad Delgado.<sup>32</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	
CD1	Hogar del Niño	San Salvador	s3'a	6.0	490	16.0	552	----	----	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB) poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como Tierra Blanca con mayor grado de consolidación.
CD2	Centro de Investigaciones Geotécnicas (C.I.G.)	San Salvador	s3'a	7.0	448	19.0	631	----	----	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó como material tipo escoria volcánica (toba gris soldada).
CD3	Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.)	Ciudad Delgado	s3'a	4.0	113	11.0	349	----	----	El primer estrato se identificó como TB en estado suelto. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como TB con mayor grado de consolidación.

Tabla 4.32 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de San Jacinto y Ciudad Delgado.<sup>30</sup>

#### 4.3.3.9 ÁREA DE SAN ROQUE

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación San Salvador. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.33. En tabla 4.34 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona.

Sigla	Descripción
s3'a	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café(ignimbritas)</b>
s2	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. <b>(lavas andesíticas, lavas basálticas y escorias)</b>
c3	Efusivas básicas intermedias. <b>(Rocas andecíticas y basálticas)</b>

Tabla 4.33 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de San Roque.<sup>32</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad* (m)	Vp (m/s)	
SR1	Cantón San Ramón	Mejicanos	s3'a	6.1	265	15.2	610	----	----	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se denominó como material tipo escoria volcánica proveniente del Volcán de San Salvador.
SR2	Centro Recreativo P.N.C.	Ayutuxtepeque	s3'a	5.9	414	10.5	515	18.5	869	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a materiales conocidos como TB con mayor grado de consolidación. El tercer estrato se vinculó a materiales tipo toba superior consolidada compuesta de materiales granulares conocidos como arena mal graduada de partículas de pómez
SR3	Cantón El Carmen	Ayutuxtepeque	c3	8.6	213	15.2	671	----	----	El primer estrato se identificó como TB poco consolidada. El segundo estrato se denominó como material tipo escoria volcánica proveniente del Volcán de San Salvador.

Tabla 4.34 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de San Roque.<sup>30</sup>

#### 4.3.3.10 ÁREA DE CORDILLERA DEL BÁLSAMO.

De acuerdo al orden cronológico, en esta área se puede apreciar que suelos sobre los cuales se ubica la zona investigada pertenecen a la formación Bálsamo. El orden de aparición de las unidades estratigráficas se muestra en la tabla 4.35. En tabla 4.36 se presentan los resultados de los estudios de refracción sísmicas realizados en dicha zona

Sigla	Descripción
<b>s3'a</b>	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas. <b>Alternancia de capas decimétrica a métrica constituida por un estrato de pómez de caída a veces con pequeños líticos y Tobas color café(ignimbritas)</b>
<b>s2</b>	Efusivas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas. <b>(lavas andesíticas, lavas basálticas y escorias)</b>
<b>b3</b>	Efusivas básicas intermedias. <b>(Rocas andesíticas y basálticas)</b>
<b>b1</b>	Epiclastitas volcánicas y piroclastitas; localmente efusivas básicas intermedias. <b>(Tobas color café(ignimbritas), cenizas y escorias (tobas aglomeráticas inferiores).</b>

Tabla 4.35 Secuencia estratigráfica geológica de los estratos en Área de Cordillera del Bálsamo.<sup>32</sup>

Ubicación en Mapa Geológico	Lugar de Estudio	Ubicación	Miembro Geológico	ESTRATO 1		ESTRATO 2		ESTRATO 3		Descripción
				Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad <sup>a</sup> (m)	Vp (m/s)	Profundidad* (m)	Vp (m/s)	
B1	Cordillera del Bálsamo	Pinares de Suiza	s3'a	9,8	300	31,4	500	—	—	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB) poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a Tierra Blanca consolidada
B2	Cordillera del Bálsamo	Colonia Paraíso	s3'a	6,1	300	24	493	—	—	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB) poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a Tierra Blanca consolidada.
B3	Cordillera del Bálsamo	Colonia las Colinas	s3'a	6,5	250	19	488	—	—	El primer estrato se identificó como Tierra Blanca (TB) poco consolidada. El segundo estrato se vinculó a Tierra Blanca consolidada.
B4	Cordillera del Bálsamo	Tierra Verde	s3'a	5,3	285	19,1	501	—	—	El primer estrato se identificó como TB consolidada. El segundo estrato se vinculó a Tierra Blanca consolidada.

Tabla 4.36 Resultados obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica en Área de Cordillera del Bálsamo.<sup>30</sup>

**4.3.4 RESUMEN DE RESULTADOS DE VELOCIDADES DE ONDAS P OBTENIDOS DE ESTUDIOS DE REFRACCION SISMICA REALIZADOS EN EL MUNICIPIO DE SAN SALVADOR Y ZONAS ALEDAÑAS.**

<b>MATERIAL</b> <b>SITIOS EN ESTUDIO</b>	<b>TIERRA BLANCA</b> <b>(Vp, m/s)</b>	<b>TOBA COLOR</b> <b>CAFÉ</b> <b>(Vp, m/s)</b>	<b>LAVA VOLCÁNICA</b> <b>ANDESÍTICA EN BLOQUES</b> <b>(Vp, m/s)</b>	<b>LAVA VOLCÁNICA</b> <b>ANDESÍTICA DENSA</b> <b>(Vp, m/s)</b>
Antiguo Cuscatlán (Boulevard Los Próceres).	199-384	442-629	842-1309	1930-2560
Col. San Benito, San Salvador.	411-433	---	640-727	---
Col. Escalón, San Salvador.	200-364	422-440	556-733	1061-1493.
Monumento Salvador del Mundo, San Salvador.	260-263* 372-488	---	776	---
Centro de San Salvador.	335-400* 457-520	---	---	---
San Jacinto y Ciudad Delgado, San Salvador.	**113-490	552-631	---	---
San Roque, Ayutuxtepeque.	213-515	610-869	---	---
Centros Comerciales El Espino, Antiguo Cuscatlán.	183-499	606-635	868-1189	1255-2338
Carretera Orden de Malta Antiguo Cuscatlán.	278-393	692-806	931-1288	1605-3418
Cordillera del Bálsamo, Sta. Tecla.	250-300	488-501	---	---
<b>RANGO</b>	113-520	442-869	556-1309	1061-3418

\*En este sitio fueron detectados dos estratos de material tipo Tierra Blanca con diferentes grados de consolidación, lo cual es apreciado en los rangos de velocidad.

\*\* Las velocidades menores a 330 m/s (velocidad del aire): son velocidades aparentes: los suelos son tan poco consolidados que atenúan la velocidad de las ondas y no las propagan, otra justificación es que depende de la forma de recepción de las ondas (los geófonos no están bien colocados)

Tabla 4.37 Tabla resumen de los resultados de Velocidad de Ondas P obtenidos de Estudios de Refracción Sísmica realizados en el municipio de San Salvador y Zonas Aledañas.

<b>MATERIAL</b> <b>SITIOS EN ESTUDIO</b>	<b>TIERRA BLANCA</b> <b>(Espesor, m)</b>	<b>TOBA COLOR</b> <b>CAFÉ</b> <b>(Espesor, m)</b>	<b>LAVA VOLCÁNICA</b> <b>ANDESÍTICA EN BLOQUES</b> <b>(Espesor, m)</b>	<b>LAVA VOLCÁNICA</b> <b>ANDESÍTICA DENSA</b> <b>(Espesor, m)</b>
Antiguo Cuscatlán (Boulevard Los Próceres).	1.0-11.3	7.0-12.3	9.0-24.0	10.0-13.0
Col. San Benito, San Salvador.	6.4-15.0	---	12.2-21.0	---
Col. Escalón, San Salvador.	2.4-6.1	7.8-9.4	12.6-21.0	24.0
Monumento Salvador del Mundo, San Salvador.	2.0-2.7* 6.1-16.8	---	13.0	---
Centro de San Salvador.	1.0-2.4* 6.5-19.2	---	---	---
San Jacinto y Ciudad Delgado, San Salvador.	6.0-11.0	16.0-19.0	---	---
San Roque, Ayutuxtepeque.	5.9-10.5	15.2-18.5	---	---
Centros Comerciales El Espino, Antiguo Cuscatlán.	1.3-10.8	11.5-24.0	13.0-20.0	24.0-36.5
Carretera Orden de Malta Antiguo Cuscatlán.	5.0-15.0	20.0-25.0	20.0-25.0	20.0-25.0
Cordillera del Bálsamo, Sta. Tecla.	5.3-9.8	19.0-31.4	---	---
<b>RANGO</b>	1.0-19.2	7.0-31.4	9.0-25.0	10.0-36.5

\*En este sitio fueron detectados dos estratos de material tipo Tierra Blanca con diferentes grados de consolidación, lo cual es apreciado en los rangos de velocidad.

Tabla 4.38 Tabla resumen de los resultados de Espesores de Materiales detectados en Estudios de Refracción Sísmica realizados en el municipio de San Salvador y Zonas Aledañas.



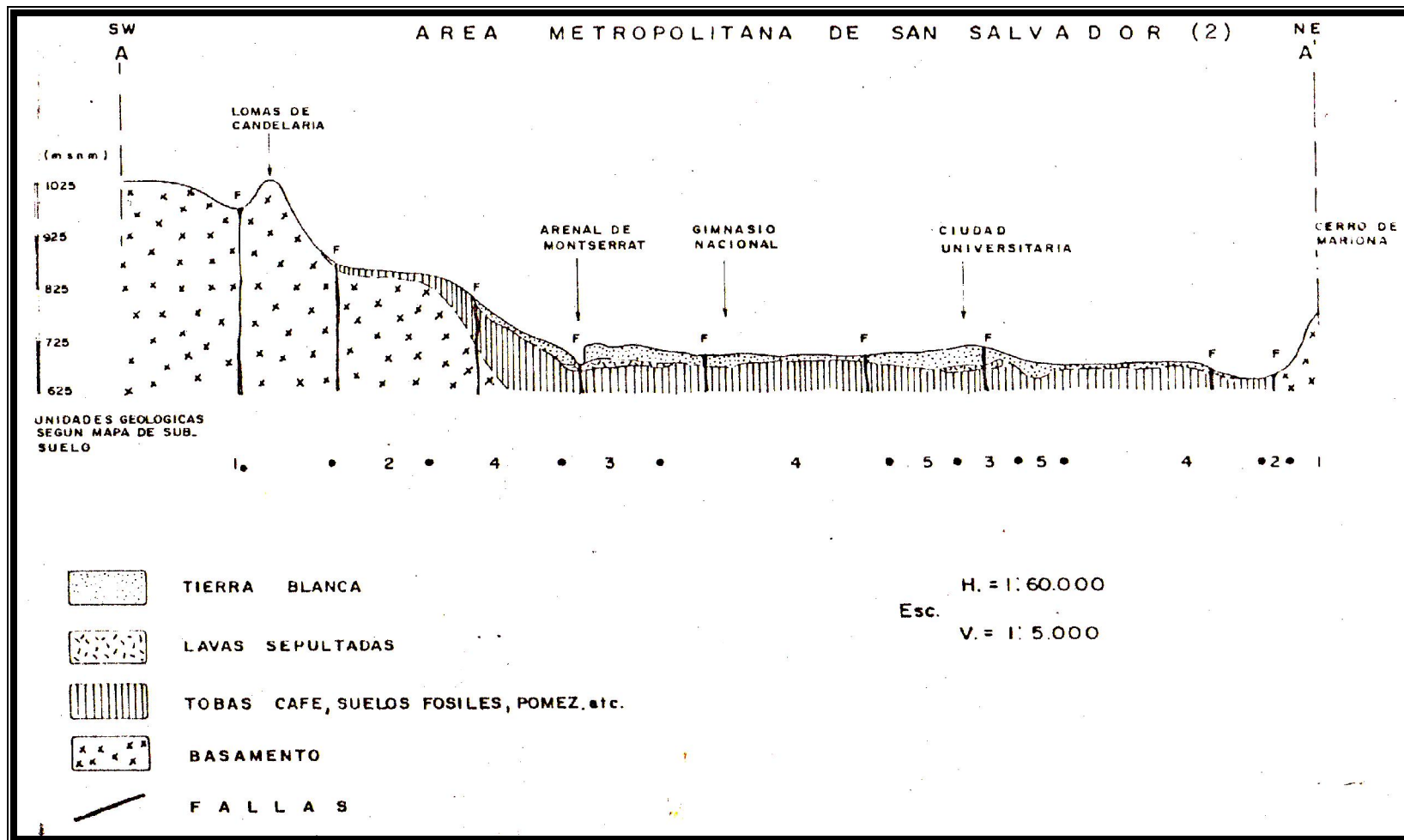


Figura 4.43 Corte geológico a través del Área Metropolitana de San Salvador.<sup>7</sup>

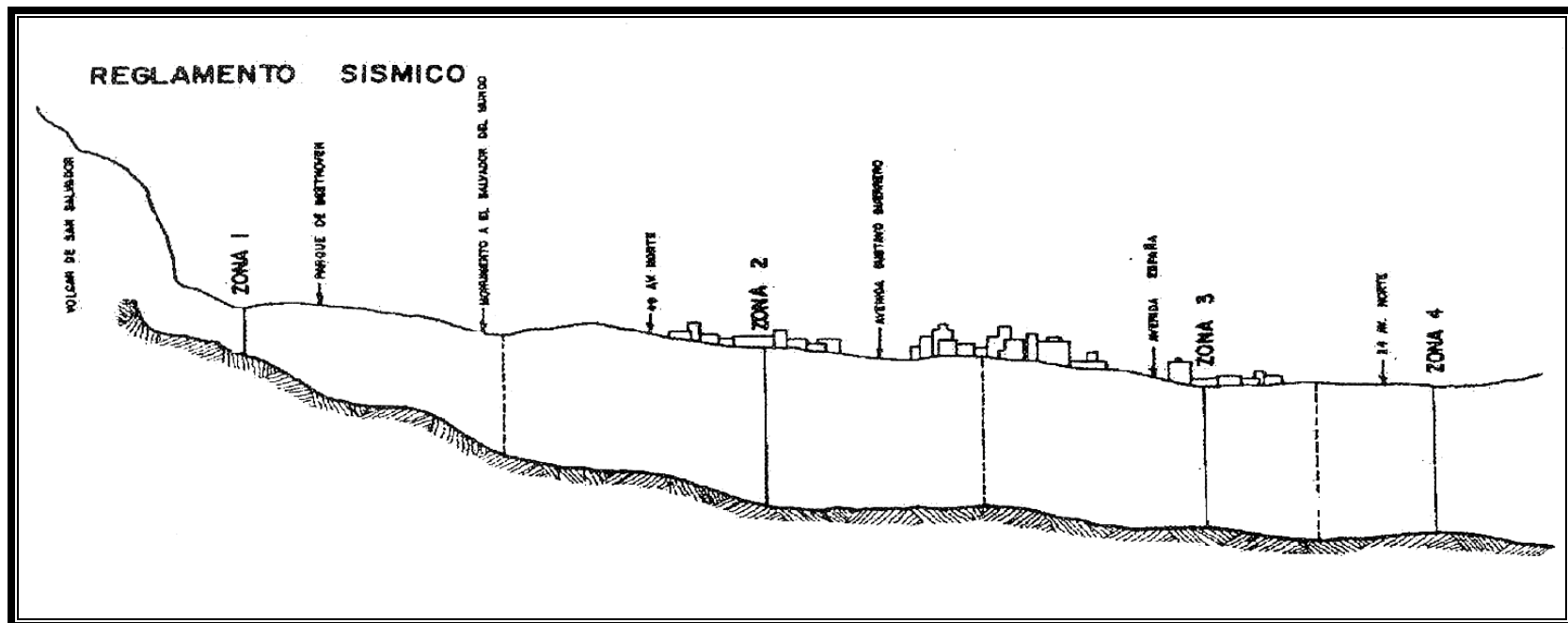


Figura 4.44 Corte geológico a través del Area Metropolitana de San Salvador.<sup>7</sup>

## CONCLUSIONES

Conclusiones respecto a valores de velocidad de ondas P:

### **Área de Antiguo Cuscatlán (Boulevard Los Próceres):**

En función de los resultados observados en los valores de velocidad de ondas P y la información geológica para esta zona se pueden determinar los siguientes puntos:

- Se detectó un primer estrato de material definido como Tierra Blanca (geológicamente conocida como Piroclastitas ácidas-epiclastitas volcánicas y clasificada geotécnicamente como SM/ML), el cual alcanza una profundidad variable entre 1.0 y 11.3 m del nivel del terreno natural y cuyo rango de Velocidad de ondas P ( $V_p$ ) se encuentra entre 199-384 m/s.
- Un segundo estrato de material definido como Toba color café (geológicamente conocida como Ignimbrita Boquerón<sup>31</sup> y clasificada geotécnicamente como SM/SC), el cual alcanza una profundidad variable entre 7.0<sup>31</sup> y 12.3 m del nivel de la superficie y cuyo rango de Velocidad de ondas P ( $V_p$ ) se encuentra entre 442-629 m/s.
- Un tercer estrato de material definido como lava volcánica andesítica en bloques (geológicamente conocida como Andesita Boquerón<sup>31</sup>), el cual se detecta a una profundidad variable entre 9.0 y 24.0 m y cuyo valor de Velocidad de ondas P ( $V_p$ ) varía entre 842 y 1309 m/s.

- Un cuarto estrato de material definido como lava volcánica andesítica densa (perteneciente probablemente a la formación bálsamo), el cual se detecta a una profundidad variable entre 10.0. y 13.0 m y cuyo valor de Velocidad de ondas P (Vp) varía entre 1930 y 2560<sup>31</sup> m/s. Se aclara que el rango de profundidades para este material está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados en esta área

**Área de Colonia San Benito, San Salvador:**

- Fue detectado un primer estrato de material definido como Tierra Blanca, el cual alcanza una profundidad variable entre 6.4 y 15.0 m del nivel del terreno natural El rango de Velocidad de ondas P (Vp) se encuentra entre 411-433 m/s
- Un segundo estrato detectado fue definido como lava volcánica andesítica en bloques (Andesita Boquerón). Este estrato alcanza una profundidad variable entre 12.2 y 21.0 m y cuyo rango de velocidades varia entre 640-727 m/s. Se aclara que el rango de profundidades para este material está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados en esta área.

**Área de Colonia Escalón, San Salvador:**

- El primer estrato detectado fue definido como Tierra Blanca, el cual alcanza una profundidad variable entre 2.4 y 6.1 m del nivel del terreno natural y cuyo rango de Velocidad de ondas P (Vp) oscila entre 200-364 m/s.

- El segundo estrato detectado fue identificado como una Toba color café (Ignimbrita Boquerón), el cual alcanza una profundidad variable entre 7.8 y 9.4 m y cuyo rango de Velocidad de ondas P ( $V_p$ ) se encuentra entre 422-440 m/s.
- Un tercer estrato detectado fue identificado como lava volcánica andesítica en bloques (andesita boquerón), el cual, alcanza una profundidad variable entre 12.6 y 21.0 m. La velocidad de ondas P ( $V_p$ ) oscila entre 556-733 m/s.
- Un cuarto estrato fue detectado a una profundidad aproximada de 24.0 m y posee un rango de Velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 1061-1493. Dicho estrato fue identificado como Lava volcánica andesítica densa. Se aclara que el rango de profundidades para este material está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados en esta área.

#### **Área del Monumento Salvador del Mundo, San Salvador:**

- El primer estrato detectado se identificó como Tierra Blanca, el cual alcanza una profundidad variable entre 2.0 y 2.7 m y presenta un rango de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 260-263 m/s.
- El segundo estrato, identificado como Tierra Blanca con mayor grado de consolidación, alcanza una profundidad variable entre 6.1 y 16.8 y presenta un rango de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 372-488 m/s.
- A mayor profundidad se detectó un tercer estrato, identificado tentativamente como lava volcánica andesítica fragmentada en bloques, el cual alcanzó una profundidad aproximada de 13.0 y presentando una velocidad de ondas P 776 m/s en uno de los tres sitio en estudio (SM1). Se aclara que el rango de

profundidades para este material está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados en esta área.

#### **Área del Centro de San Salvador:**

- El primer estrato detectado se identificó como Tierra Blanca, el cual alcanza una profundidad variable entre 1.0 y 2.4 m y presenta un rango de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 335-400 m/s.
- El segundo estrato detectado se identificó como Tierra Blanca con mayor grado de consolidación, el cual alcanza una profundidad variable entre 6.5 y 19.2 m y presenta un rango de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 457-520. m/s. Se aclara que el rango de profundidades para este material está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados en esta área.

#### **Área de San Jacinto y Ciudad Delgado, San Salvador:**

- El primer estrato detectado se identificó como Tierra Blanca, el cual alcanza una profundidad variable entre 6.0 y 11.0 m y presenta un rango de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 113-490 m/s.
- El segundo estrato detectado se identificó tentativamente como una Toba color café (llamada Toba Soldada al material presente en las proximidades del Centro de Investigaciones Geotécnicas), el cual alcanza una profundidad variable entre 16.0 y 19.0 m y presenta un rango de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 552-631. m/s. Este material fue detectado en las cercanías del

Cerro San Jacinto. Además, se aclara que el rango de profundidades para este material está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados en esta área.

**Área de San Roque, Ayutuxtepeque:**

- El primer estrato detectado se identificó como Tierra Blanca, el cual alcanza una profundidad variable entre 5.9 y 10.5 m y presenta un rango de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 213-515 m/s.
- El segundo estrato detectado se identificó tentativamente como una Toba color café (Toba soldada o unidad G1<sup>31</sup> proveniente del Volcán de San Salvador, sector Picacho), el cual alcanza una profundidad variable entre 15.2 y 18.5 m y presenta un rango de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 610-869. m/s. Se aclara que el rango de profundidades para este material está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados en esta área.

**Área de Centros Comerciales El Espino, Antiguo Cuscatlán:**

- Se detectó un primer estrato de material definido como Tierra Blanca, el cual alcanza una profundidad variable entre 1.3 y 10.8 m del nivel del terreno natural y cuyo rango de Velocidad de ondas P ( $V_p$ ) se encuentra entre 183-499 m/s.
- Se ha detectado un segundo estrato de material definido como Toba color café (Ignimbrita Boquerón<sup>31</sup>), el cual alcanza una profundidad variable entre 11.5 y 24.0 m desde el nivel de la superficie y cuyo rango de Velocidad de ondas P ( $V_p$ ) se encuentra entre 606-635 m/s.

- Se ha detectado un tercer estrato de material definido como lava volcánica andesítica en bloques (Andesita Boquerón<sup>31</sup>), el cual se detecta a una profundidad variable entre 13.0 y 20.0 m y cuyo valor de Velocidad de ondas P (Vp) varía entre 868 y 1189 m/s.
- Se ha detectado un tercer estrato de material definido como lava volcánica andesítica densa, el cual se detecta a una profundidad variable entre 24.0 y 36.5 m y cuyo valor de Velocidad de ondas P (Vp) varía entre 1255 y 2338 m/s. Se aclara que el rango de profundidades para este material está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados en esta área.

#### **Área de Carretera Orden de Malta y Calle a Huizúcar, Antiguo Cuscatlán:**

- Se detectó un primer estrato presente a lo largo de toda la longitud de la vía compuesto de un conjunto de materiales definidos como Tierra Blanca (material suprayacente) los cuales en conjunto, alcanzan una profundidad variable entre 5.0 y 15.0 m a partir del nivel del terreno natural y cuyo rango de Velocidad de ondas P (Vp) se encuentra entre 278-393 m/s.
- Un segundo estrato compuesto por una Toba color café (conocida geológicamente como G1<sup>31</sup>) está entre 692-806 m/s en diferentes de la vía.

#### **Área de Cordillera del Bálsamo, Santa Tecla:**

- Se detectó un primer estrato de material compuesto de Tierra Blanca con alternación de pequeñas capas de lapilli acrecionales provenientes de la explosión freato-magmática del Plan de La Laguna, el cual alcanza una profundidad variable entre 5.3



y 9.8 m del nivel del terreno natural y cuyo rango de Velocidad de ondas P ( $V_p$ ) se encuentra entre 250-300 m/s.

- Se ha detectado un segundo estrato de material definido como Toba color café (conocida geológicamente como G1), el cual alcanza una profundidad variable entre 19.0 y 31.4 m desde el nivel de la superficie y cuyo rango de Velocidad de ondas P ( $V_p$ ) se encuentra entre 488-501 m/s. Se aclara que el rango de profundidades para este material está en función del máximo valor en profundidad alcanzado por los ensayos de refracción sísmica realizados en esta área.
- Se concluye que esta zona tiene una alta probabilidad de sufrir deslizamientos debido a los bajos valores de velocidad de onda P que muestra el estrato superficial y las grandes pendientes que presentan las laderas de la cordillera del bálsamo próximas al área sur de la ciudad de Santa Tecla.

## CONCLUSIONES GENERALES

- Tabulando la información de las velocidades de ondas P en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) se concluye que el rango de velocidades para materiales tipo Tierra Blanca (geológicamente conocida como Piroclastitas ácidas-epiclastitas volcánicas y clasificada geotécnicamente como SM/ML) tiene valores entre 113-520 m/s. Para materiales tipo Toba Color Café (geológicamente conocida como Ignimbrita Boquerón y clasificada geotécnicamente como SM/SC) tiene valores entre 442-869 m/s. Para materiales

tipo Lava Volcánica Andesítica en Bloques (geológicamente conocida como Andesita Boquerón) tiene valores entre 556-1309 m/s. Finalmente, para material tipo Lava Volcánica Andesítica Densa tiene valores entre 1061-3418 m/s.

- El espesor del estrato del material tipo Tierra Blanca tiende a aumentar de espesor en las siguientes direcciones dentro del AMSS: de poniente a oriente (desde Col. Escalón hasta el Centro de San Salvador), de sur a Norte (desde Bo. San Jacinto hasta Ciudad Delgado). Se puede decir que según la tendencia de los estudios de refracción sísmica realizados a la fecha en el AMSS los mayores espesores de Tierra Blanca se encuentran en el Centro de San Salvador y en Ciudad Delgado.
- El material que se definió como Tierra Blanca para la zona de Santa Tecla y la Carretera Boulevard Orden de Malta es predominantemente lapilli acrecional proveniente de la explosión del extinto volcán La Laguna (Plan de La Laguna) con una presencia discreta de materiales tipo Tierra Blanca, los cuales presentan velocidades muy semejantes debido probablemente a condiciones similares de depositación (caída piroclástica).
- En ninguno de los estudios de refracción sísmica recopilados en este rebajo de graduación, fue detectada la presencia de nivel de agua freática para el AMSS.

- En la fase de investigación de un sitio donde se pretende desarrollar una edificación de gran importancia (edificios, carreteras, obras de mitigación, etc), la ubicación, número y profundidad mínima aproximada requerida de los sondeos geotécnicos (sondeos S.P.T. y sondeo rotativos) puede ser predeterminada de una forma aproximada con el método de refracción sísmica, para poder estimar el costo de la realización de una campaña geotécnica.
- El ensayo de prospección sísmica que puede ser empleado con mayor frecuencia en El Salvador es el ensayo de refracción sísmica, pues éste tiene la ventaja de permitir la exploración preliminar del subsuelo en extensiones considerables a relativamente bajo costo debido a su carácter no destructivo, en comparación con otros ensayos sísmicos como Up Hole, Down Hole y Cross Hole (utilizados para aplicaciones específicas más importantes y que implica la ejecución de perforaciones verticales, lo cual incrementa su costo).
- El ensayo de refracción sísmica es una de las técnicas más consolidadas en Ingeniería Civil, ya que es apta y utilizable dentro de los estudios geotécnicos de edificación. Sin embargo, debido a que es un método donde la experiencia del interpretador es uno de los factores mas importantes para evitar las ambigüedades que puedan presentar los resultados del ensayo (distintas características de los materiales y sus posibles combinaciones pueden dar una misma respuesta física y llevar a errores en la interpretación), los resultados

deben ser tratados con cautela, además, deben ser acompañados de otros ensayos geotécnicos (Sondeos por percusión S.P.T., sondeos rotativos o calicatas) que complementen o corroboren los resultados.

- Una de las aplicaciones del ensayo de refracción sísmica en el área de carreteras es identificar y determinar profundidades de materiales, con el objetivo de establecer las características y dureza que presentan, para la utilización de maquinaria o explosivos en la etapa de factibilidad.
- El método de refracción sísmica presenta limitantes en la identificación de capas de estratos en el subsuelo que presentan espesores delgados, que no permiten al sismógrafo identificar la interfaz entre materiales diferentes e impiden obtener registros de ondas refractadas y establecer cambios de pendientes en las domocronicas en la etapa de procesamiento de datos; interpretando los resultados como un solo material.

#### RECOMENDACIONES.

- Se recomienda la aplicación de métodos de exploración (S.P.T, calicatas, exploraciones rotativas, etc.) para establecer una comparación directa de los materiales y espesores que se encuentran en los estratos investigados, debido a

que el método presenta limitantes en detectar con exactitud las interfaces entre estratos de espesores delgados.

- Se recomienda realizar los ensayos de refracción sísmica in situ y establecer los valores de velocidad para ese lugar, y no generalizar los resultados proporcionados por este trabajo de graduación.
- Se recomienda establecer un rango de valores para otras zonas del país, en donde existan diferentes materiales (San Miguel, Santa Ana, etc.), y establecer rangos de velocidades de ondas “P” para nuestro país en específico.
- Promover la implementación de la carrera de ingeniería sísmica dentro de la Universidad de El Salvador, debido a que hay muy pocos profesionales en el área, que tienen que salir fuera del país y especializarse
- Nuestra normativa debe ser más rigurosa, y exigir el uso de métodos sísmicos u otros métodos de exploración, para la construcción de obras civiles de importancia.
- El ensayo de refracción sísmica no posee un alto grado de precisión en el cálculo de las profundidades a las cuales se ubican las interfases entre estratos de materiales sub-superficiales, por lo tanto, dichos datos deben ser tomados con

cautela, específicamente en la estimación de actividades de terracería y las obras relacionadas a las cimentación de obras civiles.

- Se recomienda que las entidades que regulan y preparan a los profesionales de la rama Ingeniería Civil en El Salvador (Ministerio de Obras Públicas, MOP; Asociación de Ingenieros y Arquitectos, ASIA; Universidad de El Salvador, UES; y Universidades Privadas) lleven a cabo programas de investigación que tiendan a conocer las características geológicas de los materiales existentes en zonas críticas del país, así como también investigaciones geotécnicas que conduzcan al conocimiento de ciertas propiedades inherentes a los mismos.
- Se recomienda que instituciones tales como el Ministerio de Obras Públicas y la Universidad de El Salvador cuente con un equipo propio para la realización del ensayo de refracción sísmica, con el fin de poder realizar investigaciones en áreas donde no sea posible costear este tipo de estudios y que la aplicación del mismo permita la determinación de niveles de riesgo y pongan en alerta a las instituciones correspondientes del peligro al que puede estar expuesta la población que habita en dichas zonas, para proceder a realizar las acciones de prevención.
- Se recomienda realizar una caracterización de los materiales presentes en el municipio de San Salvador y zonas aledañas utilizando otros tipos de ensayos

geofísicos, tales como resistividad eléctrica y cross-hole que permitan definir mejor la ubicación en profundidad del estrato rocoso y la determinación de velocidades de ondas P y S, respectivamente. Con ellos se logrará cuantificar y evaluar mejor el espesor del estrato de Tierra Blanca y la determinación de parámetros del suelo tales como modulo de poisson, módulo de elasticidad o de Young, módulo de resistencia al corte de los suelos y rocas.

- A través del análisis de ondas “P” y “S” se puede obtener información para evaluar parámetros dinámicos del suelo.

## GLOSARIO

*Frecuencia:* Número de ciclos o vibraciones de un movimiento periódico, que se producen durante una unidad de tiempo

*Período:* Se refiere al tiempo que transcurre para que un cuerpo en movimiento periódico (generado por una onda) vuelva a su posición que tenía al principio y complete un ciclo.

*Densidad:* Relación entre la masa y el volumen de un cuerpo (suelo en este caso).

*Incompresibilidad:* Es una medida de la resistencia de los materiales elásticos a la compresión, es decir, al cambio de volumen sin que varíe su forma.

*Módulo de rigidez:* Es la cantidad de esfuerzo por unidad de deformación.

*Impedancia:* Es una medida de la resistencia a la propagación de las ondas. Es el producto de la densidad y Velocidad.

*Amortiguamiento:* Disminución progresiva, en el tiempo, de la intensidad de un fenómeno periódico

*s4 o Tierra Blanca:* Tierra Blanca: Piroclásticas ácidas y Epiclásticas volcánicas subordinadas; localmente efusivas ácidas (s3'b)



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

### REFERENCIAS EN INTERNET

1. Rosales Climent, Cristina, ( 2001): Tesis “Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos del Área del Canaveral, Cali, Colombia”, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.  
<http://osso.univalle.edu.co/doc/contib/Tesis-Cris-DocuementoFinal-13septiembre2001.pdf>
2. Rodríguez Manuel Arlande (2001): “Geofísica Aplicada a la Obra Civil. Método Geolétrico y Sísmica de Refracción. Casos Prácticos”. Geoconsult Ingenieros Consultores, Valencia, España.  
<http://www.geoconsult.es/>
3. Ampuero S. Alejandro,(1999): “Velocidades de Onda medidas en Santiago con el Ensayo de Refracción Sísmica”, Pontificia, Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.  
[http://www.dictuc.cl/geotecnia/imagenes/Velocidades\\_de\\_onda\\_en\\_Santiago.pdf](http://www.dictuc.cl/geotecnia/imagenes/Velocidades_de_onda_en_Santiago.pdf)
4. MSc. Ing. Huamán Egoávil-Bach Carlos, (1999-2000): Programa Científico PC-CISMID “Implementación del Equipo de Adquisición de datos de Prospección Sísmica”, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.  
<http://www.bvsde.paho.org/bvsade/e/fulltext/uni/proy9.pdf>

5. Garcia Hermoso, Fernando (2006): “Estudios Geotécnicos” Escuela Politécnica Superior, Huesca, España.  
<http://epsh.unizar.es/-serreta/documentos/Gecotecnia.pdf>
6. Foti, Sebastiano (2000): Thesis PhD Degree in Geotechnical Engineering “Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves”. Politecnico di Torino, Italy.  
[www.polito.it/soilmech/sasw/SF\\_PhD\\_diss.pdf](http://www.polito.it/soilmech/sasw/SF_PhD_diss.pdf)
7. [www.cedex.es](http://www.cedex.es)
8. [www.gestodedios.com](http://www.gestodedios.com)
9. Choon B. Park, Richard D. Miller, Jianghai Xia, and Julian Ivanov. : “Seismic Characterization of Geotechnical Sites By Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) Method”, Kansas Geological Survey, The University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA.  
<http://www.kgs.ku.edu/Geophysics2/Pubs/Pubs/PAR-01-05.PDF>
10. Bommer, Julian (Julio-Agosto 1996/1996): “Terremotos, urbanización y riesgo sísmico en San Salvador”, Boletín N° 18 , Prisma  
<http://taishin.org.sv/documentosPDF/TerremotosUrbanizacionyriesgosismicoenSan%20Salvador.pdf>
11. U.S. Geological Survey, (1988): “Riesgos volcánicos en la Región de San Salvador”, San Salvador, El Salvador  
<http://www.snet.gob.sv/Geologia/Vulcanologia/amenazas/laharVSS.pdf>

12. GEOMETRICS (2001): Operator's Manual "GEODE and StrataVisor NZ/NZC"  
<http://www.geometrics.com>
13. Redpath, Bruce, (1973): "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations, Explosive Excavation Research Laboratory Livemore, California U.S.A."  
[http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jps?osti\\_id=4409605](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jps?osti_id=4409605)
14. Álvarez Manilla A.A., (2003): "Evaluación Indirecta de los Módulos Elásticos de Rigidez in Situ y la Relación entre Vp/Vs y el Angulo de Fricción Interna", Instituto Mexicano de Transporte, México.  
<http://www.imt.mx/Espanol/publicaciones/pubtec/pt225.pdf>

#### TRABAJOS DE GRADUACION CONSULTADOS

15. Gonzáles García, José Alberto, (1966): Tesis " Principios de Geofísica Exploratoria, Su Aplicación en los Estudios del Campo Geotérmico de Ahuachapan", U.E.S., San Salvador, El Salvador.
16. Linares Elizondo, Roberto (1985): Tesis "Microzonificación Sísmica del A.M.S.S. basada en Observación de Micro-temblores, Espectros de Respuesta y Registros de Sismocópios". U.C.A. San Salvador, El Salvador.
17. Estupinián Mendoza, Rubén: (2003): Tesis "Investigación de las Propiedades Dinámicas de los Suelos de San Salvador", U.A.E., San Salvador, El Salvador.
18. Chorro, Mauricio René.(2006): Tesis "Análisis y Verificación de Interacción Dinámica Suelo-Estructura". U.C.A. San Salvador, El Salvador.

19. Hernández Molina, Marta Eugenia (Abril de 1998): Tesis “Elementos de Amenaza Sísmica en la Región Metropolitana de San Salvador”, U.C.A., San Salvador, El Salvador.
20. Aguilar Colato, Rolando Alberto (1984): “Criterios Geotécnicos de Microzonificación y Estimación de las Propiedades Dinámicas de los Suelos del Área Metropolitana de San Salvador”, U.C.A., San Salvador El Salvador.

#### DOCUMENTOS CONSULTADOS:

21. Consorcio Salvador E. Italtel (1988): Programma di Ricostruzione “Valutazione Della pericolosità sismica nelle aree del distretto Sanitario A3 (San Salvador) e del distretto 7 (Apopa)”, San Salvador, El Salvador.
22. Halliday, Halliday – Resnick, Robert (1982): “Física parte 2.”. Tercera Edición en Español
23. Boletín técnico (2003): “Caracterización de suelos con métodos geofísicos”, Guaira, Macuto Venezuela.
24. ASTM Designation D5777 (1995): “Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation”, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pa.
25. U.S. Army Corps of Engineers, (August 1995): “Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations”, Washington D.C., U.S.A.
26. Braja M. Das; “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, Thomson Editores, S.A. de C.V., California, State, Sacramento, U.S.A.

27. Misión Geológica Alemana(1969): “Mapa Geológico de El Salvador”  
ESC:1:100,000, San Salvador, El Salvador.
28. Ing. Francés, Ignacio (2007): “Estudio de Suelos en Parqueo Norte de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura”, Realizado por F.C. S.A, de C.V, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
29. Recopilación de estudios de refracción sísmica realizados en el municipio de San Salvador y zonas aledañas

#### ENTREVISTAS REALIZADAS:

30. González, José Antonio. (2007): Entrevista “Estudios Realizados con Refracción Sísmica en El Salvador” CONTECSA S.A. de C.V.
31. Walter Hernandez,(2007). Entrevista: “Recopilación de estudios de refracción sísmica realizados en el municipio de San Salvador y zonas aledañas, Servicio Nacional de Estudios Territoriales.(SNET) .

#### APUNTES:

32. Campos Susan (2003): Apuntes de Clases “Clasificación de los Ensayos de Laboratorio”
33. Ing. Manuel López, (2005): “Apuntes de clase “Fundamentos de Dinámica de Estructuras e Ingeniería Sísmica

# ANEXOS

# **ANEXO I**

MATERIALES	VELOCIDAD	
	ft/s	m/s
Suelo Natural y roca		
Suelo intemperizado	800 a 2000	240 a 610
Grava o arena seca	1500 a 3000	460 a 915
Arena saturada	4000 a 6000	1220 a 1830
Arcilla saturada	3000 a 9000	910 a 2750
Agua	4700 a 5500	1430 a 1665
Agua de mar	4800 a 5000	1460 a 1525
Arenisca	6000 a 13000	1830 a 3960
Esquisto, arcilla esquistosa	9000 a 14000	2750 a 4270
Tiza o Yeso	6000 a 13000	1830 a 3960
Caliza	7000 a 20000	2134 a 6100
Granito	15000 a 19000	4575 a 5800
Roca metamórfica	10000 a 23000	3050 a 7000

**Tabla 3.A** Rango de Velocidades para Ondas Compresionales en Suelo y Roca.

(Fuente: “Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation”. NORMA ASTM D 5777.)

MATERIAL	Vp (m/s)	Pb (T/m <sup>3</sup> )	N
Aire	330	-	-
Marga Humedecida	300-750	-	-
Arena Seca	450-900	1.6-2.0	0.3-0.35
Arcilla	900-1800	1.3-1.8	~0.5
Agua Fresca Superficial	1430-1490	1.0	--
Arena Suelta Saturada	1500	-	-
Roca	-	-	0.15-0.25
Ígnea Alterada y Roca Metamórfica	450-3700	-	-
Roca Sedimentaria Alterada	600-3000	-	-
Esquisto	800-3700	-	-
Arenisca	2200-4000	1.9-2.7	-
Roca Metamórfica	2400-6000	-	-
Basalto Inalterado	2600-4300	2.2-3.0	-
Dolomita y Caliza	4300-6700	2.5-3.0	-
Granito Inalterado	4800-6700	2.6-3.1	-
Acero	6000	-	-

**Tabla 3B.** Valores Típicos o Representativos de Campo de Vp, Pb (densidad) y v (Modulo de Poisson) para Varios Materiales.

(Fuente: “Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations”. U.S. Army Corps of Engineers. Washington D.C. August 1995).



Material	ft/s (m/s)	Material	ft/s (m/s)
<i>Suelo Superficial:</i>		Roca Suelta-Talus	1250-2500 (381-762)
Ligero y Seco	600-900 (183-274)	Roca Alterada y Fracturada	1500-10000 (457-3048)
Húmedo, Lodoso o Cienoso	1000-1300 (305-396)	<i>Esquisto:</i>	
Arcilloso	1300-2000 (396-610)	Río Olentangy, Ohio	9000-11000 (2743-3353)
Arcilla Roja en Colorado	1630 (497)	Upper Susquemanna	10200-12800 (3109-3901)
Arcilla Arenosa Semi-Consolidada	1250-2150 (381-655)	Zona del Canal de Panamá	7000-8000 (2134-2438)
Marga Húmeda	2500 (762)	Mancos, Colorado	2600-2900 (793-884)
Arcilla, Densa y Húmeda. Dependiendo de la Profundidad	3000-5900 (914-1798)	Esquisto Romney, Río Shennandoah. Alterado	4000-6500 (1219-1981)
Escombros (Ripio) o Grava (Arena Gruesa)	1970-2600 (600-793)	Esquisto Romney, Río Shennandoah. Sano	12000 (3658)
Arena Cementada	2800-3200 (853-975)	Sitio Represa John Marshall	2900-4250 (884-1295)
Arena Arcillosa	3200-3800 (975-1158)	Phyllite York. PA	10000-11000 (3048-3353)
Arena Arcillosa Cementada	3800-4200 (1158-1280)	<i>Arenisca:</i>	7200-7900 (2195-2408)
Arena Saturada	4600 (1402)	Devonian-Upper Susquemanna	14000 (4267)
Arena	4600-8400 (1402-2560)	Zona del Canal, Fin Pacifico	7000-9000 (2134-2743)
Arcilla, Arenisca Arcillosa	5900 (1798)	Colorado, Denso, Pesado y Continuo, con Pocas Fallas	7250 (2210)
Glacial Hill, Upper Susquemanna	5600-7400 (1707)	Colorado, Conteniendo Fallas Alteradas y Áreas Suaves	4725 (1440)

**Tabla 3C:** Velocidad de Propagación de Ondas Sísmicas en Materiales Sub-superficiales.

(Fuente: Bruce Redpath. "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations". Explosive Excavation Research Laboratory Livmore, California U.S.A. 1973).

Material	ft/s (m/s)	Material	ft/s (m/s)
Glacial Moraine Deposit, Dry-California	2500-5000 (762-1524)	Río Colina Humeante, Kansas	6000-7500 (1829-2286)
Glacial Moraine Deposit, Saturated-California	5000-7000 (1524-2134)	Arenisca Conglomerada	8000 (2438)
Lava Cementada Aglomerada, California	5000-6000 (1524-1829)		
<i>Yeso:</i>		<i>New Hampshire (comparación de las velocidades con registros de perforaciones)</i>	
Sitio de Represa Fuerte Randall-Encima del Nivel Freático	6300-7000 (1920-2134)	Muestra Planos de Unión pero Pequeños Signos de Alteración. Aunque Algunos de ellos están abiertos.	10000-13000 (3048-3962)
Sitio de Represa Fuerte Randall-Debajo del Nivel Freático	8000 (2438)	Enteramente Inalterado y sin Fallas.	16000-20000 (4877-6096)
<i>Granito:</i>		Granodiorita	15000 (4572)
<i>Cordillera Sierra Nevada, California (en los cortes del camino)</i>		Basalto-Zona del Canal- Alterada y Fracturada	9000-14000 (2743-4267)
Desmenuzable y Altamente Descompuesto	1540 (469)	Caliza, Dolomita, Rocas Metamórficas, Rocas Masivas.	16400-20200 (4999-6157)
Seramente Fracturado y en Parte Descompuesto	2200 (671)	Diabase, en el Fondo de Río Ancho, Carolina del Sur	19700 (6005)
Suavizada y en Parte Descompuesto	10500 (3200)	Greenstone, Juntas Bien Ajustadas.	16100 (4907)

**Tabla 3C** (Continuación). Velocidad de Propagación de Ondas Sísmicas en Materiales Sub-superficiales.

(Fuente: "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations". Explosive Excavation Research Laboratory Livemore, California. 1973).

Material	ft/s (m/s)	Material	ft/s (m/s)
Sólido y Monolítico Hasta 70 pies de Profundidad	18500 (5639)	Greenstone, Juntas Ligeras	13300 (4054)
<i>New Hampshire (comparación de las velocidades con registros de perforaciones)</i>			
Seramente Quebrada y Alterada: Frecuentemente solo Astillas y Fragmentos Recuperados. Segmento de núcleo muy largo, pero alterado tubo una penetración de alrededor de ¼ de pulgada en cada lado de los planos de unión en que una película de arcilla residual se había formado.	3000-8000 (914-2438)		

**Tabla 3C** (Continuación). Velocidad de Propagación de Ondas Sísmicas en Materiales Sub-superficiales.

(Fuente: "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations". Explosive Excavation Research Laboratory Livemore, California. 1973).

MATERIAL	VELOCIDAD	
	ft/s	m/s
Material Superficial Alterado	1000-2000	305-610
Grava, Escombros (Ripio) o Arena (Seca)	1500-3000	468-915
Arena (Húmeda)	2000-6000	610-1830
Arcilla	3000-9000	915-2750
Agua (Dependiendo de la Temperatura y Contenido de Sal)	4700-5500	1430-1680
Agua de Mar	4800-5000	1460-1530
Arenisca	6000-13000	1830-3970
Esquisto	9000-1400	2750-4270
Yeso o Tiza	6000-13000	1830-3970
Caliza	7000-20000	2140-6100
Sal	14000-17000	4270-5190
Granito	15000-19000	4580-5800
Rocas Metamórficas	10000-23000	3050-7020
Hielo	12050	-

**Tabla 3D.** Clasificación de Acuerdo a Materiales.

(Fuente: Bruce Redpath. "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations". Explosive Excavation Research Laboratory Livemore, California U.S.A. 1973).

MATERIAL	m/s	MATERIAL	m/s
Tierra Suelta	250-400	Pizarras	2500-4500
Limos y Arenas Flojas	350-500	Margas	2500-4500
Arenas y Gravas Seltas	400-900	Calizas	3000-5500
Arenas y Gravas Seltas Saturadas	1500-1800	Areniscas	2000-4500
Agua	1450-1600	Granitos	3500-5500
Arcillas	900-2500	Sal	4000-5000

**Tabla 3E.** Velocidad de las Ondas P en las Litologías Más Comunes.

(Fuente: Rodríguez, Manuel Arlandi. “Geofísica Aplicada a la Obra Civil. Método Geoléctrico y Sísmica de Refracción. Casos Prácticos” Geoconsult Ingenieros Consultores. Valencia, España. 2001).

MEDIO	Vp (m/s)
Material Superficial Meteorizado	305-610
Gravas, Guijo, Arenas (Seca)	468-915
Arena (Húmeda)	610-1830
Arcilla	915-2750
Agua (Dependiendo de la T° y del Contenido de Sales)	1430-1630
Agua de Mar	1460-1530
Arenisca	1830-3970
Shale (Roca Arcillosa que se parte en Laminas)	2750-4270
Tiza (Chalk-Arcillas)	1830-2970
Calizas (Limestone)	2140-6100
Sal	4270-5190
Granito	4580-5800
Rocas Metamórficas.	3050-7020

**Tabla 3F.** Velocidades Típicas de Ondas P.

(Fuente: “Tesis sobre el Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos del Área de Cañavalejo, Cali, Colombia”. Universidad del Valle, Cali, Colombia. 2001).

MATERIAL	VELOCIDAD DE COMPRESIÓN (m/s)
Material Superficial (capa de alteración de suelos y rocas)	305-610
Grava, arena y arcillas (secas y húmedas)	468-915
Arena húmeda	610-1830
Areniscas y lutitas	1830-4270
Caliza	2140-6100
Granito	4580-5800
Rocas metamórficas	3050-7020

**Tabla 3G.** Rangos Usuales de Variación de la Velocidad de Compresión en Diversos Tipos de Materiales Geológicos.

(Fuente: “Geofísica Aplicada en los Proyectos Básicos de Ingeniería Civil”. Instituto Mexicano de Transporte, 2003).

MATERIAL	ONDA P (m/s)	ONDA S (m/s)
Sedimentos no consolidados	300-2500	100-500
Arenas Compactas	1500-5400	800-2000
Rocas Sedimentarias	3500-5500	1500-3000
Rocas Metamórficas	4500-6000	2500-3500
Limos	3000-6000	2000-3000
Rocas Ígneas	4500-7500	3500-4000
Agua	1500	0
Cieno	1400-1800	50-300
Gravas y Arenas Densas	250-300	150-200
Granito	5200	3000
Basalto	6400	3200
Calizas	2400	1350
Areniscas	3500	2150

**Tabla 3H.** Velocidades de Ondas P y S en Diferentes Medios.

(Fuente: “Manual of Seismological Observatory Practice”, World Data Center for Solid Earth Geophysics, Report SE-20, Japón, 1979.)

Material	Vp ft/s (m/s)	Vs ft/s (m/s)
Gravas Saturadas (Limpia)	5000 (1500)	1000 (300)
Gravas Saturadas (Sucia)	5000 (1500)	2000 (600)
Depósitos de Arcilla	5000 (1500)	3000 (900)
Roca alterada (Intemperizada)	5000 (1500)	2000-3000 (600-900)
Carbón	5000 (1500)	3000 (900)
Arena movediza	5000 (1500)	0 (0)

**Tabla 3I.** Velocidades de Ondas P y S en Diferentes Medios.

(Fuente: “Borehole Shear Wave Survey for Engineering Site Investigations”. Geostuff, 2002.)

# ANEXO II

TIPO DE SUELO	RELACION DE POISSON, $\nu$
Arena suelta	0.2-0.4
Arena media	0.25-0.4
Arena densa	0.3-0.45
Arena limosa	0.2-0.4
Arcilla blanda	0.15-0.25
Arcilla media	0.2-0.5

**Tabla 3J.** Valores representativos de la relación de Poisson.

(Fuente: Braja M. Das; “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.”) Nótese que los esfuerzos normales horizontales dependen de la relación de Poisson del medio. Sin embargo para el esfuerzo normal vertical es independiente de la relación de Poisson.

Estudio	Resultados
Stokoe & Woods (1972)	$\nu = 0.31$ para sedimentos no consolidados y no saturados.
Davis & Schulteiss (1980)	Rango entre $0.4982 < \nu < 0.4997$ para arcillas
Stuempel et al. (1984) Meissner et al. (1995)	$\nu = 0.49$ para sedimentos superficiales, arcillosos y saturados.
Tiab & Donaldson (1996)	Rango $0.14 < \nu < 0.41$ para diferentes litologías y grados de saturación.

**Tabla 3K.** Algunos Cocientes de Poisson según Salem. (Fuente: “Tesis sobre el Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos del Área de Cañavalejo, Cali, Colombia”. Universidad del Valle, Cali, Colombia. 2001.)

Tipo de Material	Relación de Poisson $\nu$
Arcilla	0.40-0.45
Arena	0.30-0.40
Roca	0.15-0.25

**Tabla 3L.** Relación de Poisson  $\nu$  asociado a diferentes tipos de material. (Fuente: “Tesis sobre el Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos del Área de Cañavalejo, Cali, Colombia”. Universidad del Valle, Cali, Colombia. 2001.)